



TONISCO-PORAUSSULKUJEN HYVÄKSYTTÄMISTARKASTELU, MALLINNUS JA LUJUUSLASKENTA

Niko Finska

Opinnäytetyö
Toukokuu 2012
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Tuotekehityksen suuntautumisvaihtoehto

FINSKA, NIKO:

Tonisco-poraussulkujen hyväksyttämistarkastelu, mallinnus ja lujuuslaskenta

Opinnäytetyö 97 sivua, josta liitteitä 57 sivua
Toukokuu 2012

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Tonisco System Oy. Yritys suunnittelee, valmistaa ja myy laitteita putkistojen käytönaikaiseen kunnossapitoon. Työn tavoitteena oli yrityksen poraussulkujen ja palveluiden hyväksyttämistarkastelu eurooppalaisten ja kansainvälisten standardien ja direktiivien vaatimuksia varten. Työssä käsiteltiin painelaitteita koskevia standardeja ja direktiivejä, joita sovellettiin poraussulkuihin.

Työn tavoite rajattiin kahteen vaiheeseen. Ensiksi työssä tuli selvittää, mitä kansainvälisiä määräyksiä poraussulkujen ja niiden valmistuksen tulee täyttää, jotta niille voidaan myöntää asiaankuuluvat käyttöluvut. Toinen osio käsitteli poraussulkujen mallinnusta sekä lujuustarkastelua, jossa tuli osoittaa, että sulut kestävät 25 barin käyttöpaineen standardien mukaisin vaatimuksin.

Työn tuloksena poraussulut luokiteltiin standardin SFS-EN 10025 ja painelaitedirektiivin 97/23/EY alle. Poraussulut mallinnettiin CATIA-ohjelmalla, minkä jälkeen suluille tehtiin käyttöpaineen aiheuttamien rasitusten lujuusopilliset tarkastelut ANSYS-ohjelmalla. ANSYS-ohjelman tulokset analysoitiin ja raportoitiin sulkukohtaisiin lujuusraportteihin, joista tehtiin lisäksi tuotekortit hyväksyttämisprosessia varten.

Lujuuslaskennan tulosten mukaan sulut DN 20 – DN 80 kestävät sekä ympärihitsatun tilanteen että sulkulevy-tilanteen rasitukset korkein varmuusluvuin. Myös sulku DN 100 kestää ympärihitsatun tilanteen hyvin, mutta sulkulevy-tilanteessa varmuusluku on alle yhden. Sulku DN 100 voidaan kuitenkin hyväksyttää lujuusteknisestä näkökulmasta opinnäytetyössä esitettyjen perusteiden pohjalta.

Tämä on opinnäytetyön julkinen versio eikä sisällä luottamuksellisia liitteitä.

Asiasanat: painelaite, sulku, mallinnus, lujuuslaskenta, standardisointi.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical and Production Engineering
Product Development

FINSKA, NIKO:

Approval Inspection, Modelling and Strength Calculation of Tonisco Drilling Valves

Bachelor's thesis 97 pages, appendices 57 pages

May 2011

The Client of the thesis was Tonisco System Ltd. The company designs, manufactures and delivers equipment to maintenance operations of pipelines. The purpose of the thesis was an approval inspection of the Tonisco drilling valves and services of the company. The idea was to get international approvals for the drilling valves and services.

There were two main objectives in the thesis. The first objective was to find and examine the international regulations the valves have to pass to get the international approvals. The second objective was to model the drilling valves and perform strength calculations. There was a need to prove the valves can handle operating pressure of 25 bars.

The result was that the drilling valves were fitted according to SFS-EN 10025 standard and pressure equipment directive 97/23/EC. The valves were modeled with CATIA-program and strength calculated with ANSYS-program. Strength reports were made according to the calculated data.

According to the strength results, the valves DN 20 – DN 80 can handle operating pressure of 25 bars with high safety factors. Valve DN 100 has, instead, a safety factor under one according to the calculations. However, due to the arguments presented in this thesis this is not an issue and the DN 100 valve can be approved.

This is the public version of the thesis and does not include confidential appendices.

Key words: pressure equipment, valve, modeling, strength calculating, standards.

SISÄLLYS

ERITYISSANASTO	5
1 JOHDANTO.....	6
2 YRITYS.....	7
3 SULKUJEN RAKENNE JA KÄYTTÖ.....	8
3.1 Rakenne	8
3.2 Sulkupuoliskojen hitsaussaumojen tarkastelu	9
3.3 Käyttö.....	10
4 STANDARDIT JA DIREKTIIVIT	12
4.1 Standardi SFS-EN 10025	12
4.2 Painelaitedirektiivi 97/23/EY	12
4.3 Sulkujen hitsaaminen	13
5 MALLINNUS JA FEM-LASKENTA	14
5.1 Mallinnus	14
5.2 FEM-laskenta.....	14
5.2.1 Elementtimenetelmän teoria ja käyttö.....	15
5.2.2 Elementtiverkko	17
5.2.3 Case 1 -tilanteen tuennat ja kuormat	18
5.2.4 Case 2 -tilanteen tuennat ja kuormat	21
5.2.5 Jännitykset.....	23
5.2.6 Siirtymät.....	25
5.2.7 Epälineaarinen analysointi	26
5.2.8 FEM-mallinnus kokoonpanolla ja CATIAlla.....	30
6 TULOKSET	33
6.1 Standardisointi	33
6.2 Maksimijännitykset ja -siirtymät	33
6.3 Hyväksyttämistarkastelu-raportit.....	36
6.4 Valmistuksessa huomioitavat seikat	37
6.5 FEM-analyysin luotettavuus	38
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	39
LÄHTEET.....	40
LIITTEET	41
Liite 1. Sulkujen tulostaulukko	41
Liite 2. Suoran puolen sulun DN 40 case 1 -lujuusraportti	42
Liite 3. Kierrepuolen sulun DN 40 case 1 -lujuusraportti	61
Liite 4. Kierrepuolen sulun DN 40 case 2 -lujuusraportti	80
Liite 5. Sulun DN 40 tuotekortti	96

ERITYISSANASTO

ANSYS Workbench	Lujuuslaskenta-ohjelma
CATIA	3D-mallinnusohjelma
CATPart	CATIAn tiedostomuoto mallinnetuille kappaleille
DN	Putken nimellissuuruus
FEM	Finite element method, elementtimenetelmä
MPa	Megapascal (paineen yksikkö)
Step	Tiedostomuoto 3D-mallinnusohjelmien väliseen tiedonsiirtoon

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena oli Tonisco System Oy:n poraussulkujen ja palveluiden hyväksyttämistarkastelu eurooppalaisten ja kansainvälisten direktiivien ja standardien vaatimuksia varten. Hyväksyttämistarkastelu sisälsi standardien ja direktiivien soveltamista poraussulkuihin sekä poraussulkujen mallinnusta ja lujuuslaskentaa.

Opinnäytetyö sisälsi kaksi vaihetta. Ensinnäkin työssä tuli selvittää mitä kansainvälisiä määräyksiä poraussulkujen ja niiden valmistuksen tulee täyttää, jotta niille voidaan myöntää asiaankuuluvat käyttöluvut. Poraussulkujen ainutlaatuisesta rakenteesta johtuen sulut eivät kuulu suoraan tiettyyn standardiin, vaan työssä täytyi tutkia eri painelaitteita koskevia standardeja ja direktiivejä, jotta sulut saataisiin asemoitua oikeiden vaatimusten alle.

Toisena vaiheena oli poraussulkujen, kooltaan DN 25 – DN 100, mallinnus ja lujuuslaskenta, jossa sulut altistettiin 25 barin käyttöpaineelle. Tuloksien avulla tuli osoittaa, että tuotteiden konstruktiot kestävät niille määrätyn käyttöpaineen varmuuslukuineen standardin mukaisin keinoin. Tuloksista tehtiin lujuusselvitys tuotteen hyväksyttämisprosessia varten.

2 YRITYS

Tonisco System Oy on vuonna 1969 perustettu tamperelainen yritys. Yritys suunnittelee, valmistaa ja myy laitteita putkistojen käytönaikaiseen kunnossapitoon. Yritys tarjoaa lisäksi haaroituspalvelua paineenalaisten haaroitusten suorittamiseksi. Vuonna 2010 noin 85 % tuotannosta kohdistui vientimarkkinoille, lähinnä Keski-Eurooppaan.

Yrityksen tuotteet ja tuoteperheet ovat laajoja ja teknisesti toimivia, mutta kehitystä tarvittaisiin niiden tuotteistamiseen sekä tuotteiden hyväksymiseen kansainvälisten direktiivien ja standardien vaatimuksia varten. Tämä opinnäytetyö toimi osana tätä tuotteistamisprosessia.

3 SULKUJEN RAKENNE JA KÄYTTÖ

3.1 Rakenne

Poraussulkujen rakenne on ainutlaatuinen, mikä asetti omia vaikeuksia niin lujuuslaskennassa kuin standardien ja direktiivien osalta. Sulkujen materiaalina käytetään EN 10025 -standardin mukaista S355J2G3-terästä. Lujuuslaskuissa piti ottaa huomioon aineen myötörajan aleneminen verrattuna aineen nimellispaksuuteen.

Asennusvalmiiseen sulkuun kuuluu kuusi osaa: sulun alapuoli, sulun yläpuoli, kaksi tiivistettä, o-rengas ja sulkulevy. Tiivisteet pitävät paineen sulun sisällä asennusvaiheessa ja o-rengas suojaa tiivisteitä hitsausvaiheessa. Sulut ovat pyörähdyskappaleita, joten ne valmistetaan kokonaan sorvaamalla sulkulevyn levyuran jyrkimistä lukuun ottamatta. Sulkupuoliskoja väliin asennetaan tiivisteet sekä o-rengas, minkä jälkeen esilämmitetty sulku hitsataan hitsausrobotilla kuvan 1 lailla. Hitsauksen jälkeen sulku pohjamaalataan ja sulkuun asennetaan CE-merkintä sekä suojatulpat. (Järvi 2011.)



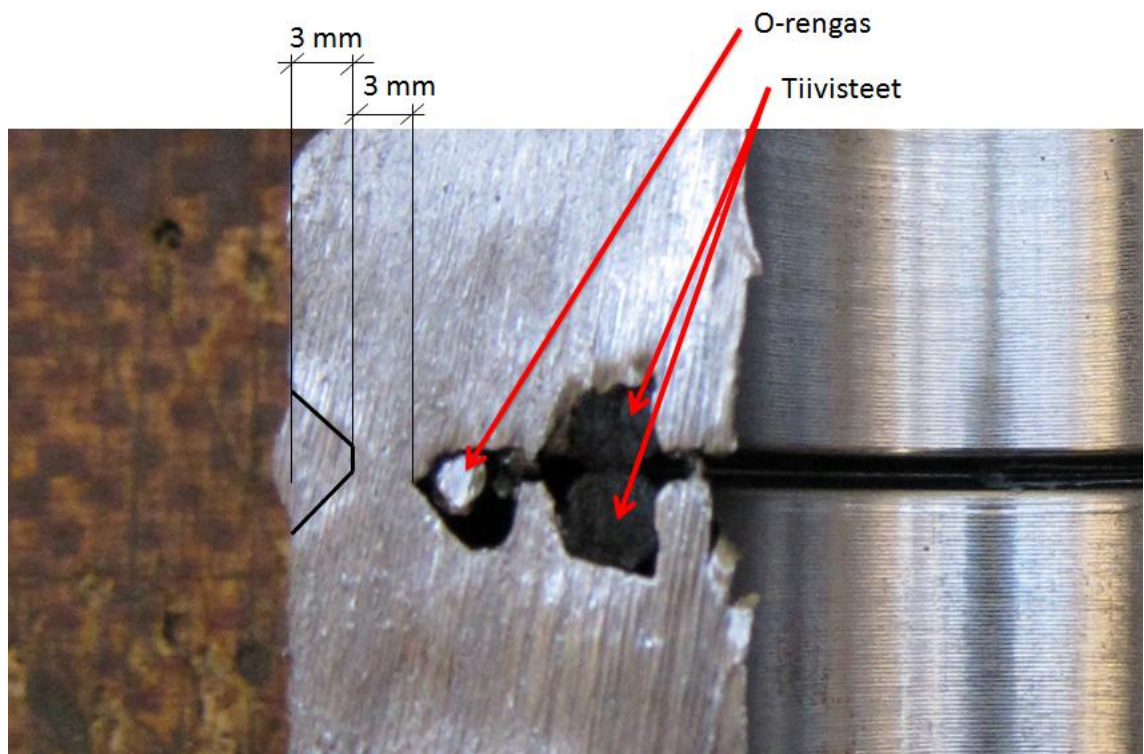
KUVA 1. Sulkupuoliskoiden hitsaus hitsausrobottia käyttäen (Kuva: Niko Finska 2011)

3.2 Sulkupuoliskojen hitsausseamien tarkastelu

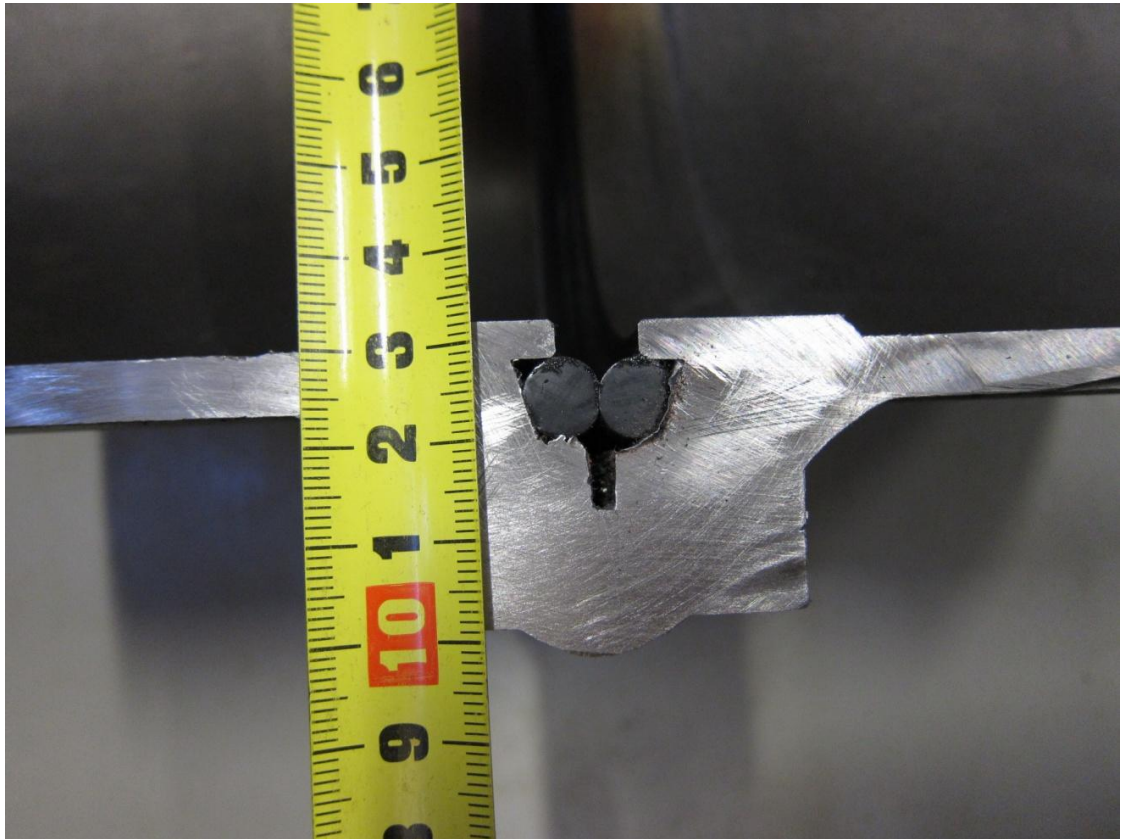
Hitsausseaman, jolla sulkupuoliskot hitsataan toisiinsa, tarkasteluun halkaistiin kaksi asennusvalmista sulkua, sulut DN 25 ja DN 200. Halkaistujen sulkujen (kuvio 1 ja kuva 2) tarkastelu osoitti, että sulkujen hitsausseaman läpituikutuminen oli noin 3–5 mm koosta riippuen. Tämän tiedon perusteella voitiin määrittellä sulkujen DN 20 – DN 100 hitsausseamien leveydet. Käytettyjen hitsausseamien leveydet ovat taulukossa 1, jossa on laskettuna hitsausseaman läpituikutuminen ja loven summa. Hitsauksen pinta-alaa mallinnettiin tekemällä sulun hitsattavaan pintaan 0,001 mm korkeuserolla oleva pinta, jotta ANSYS:ssa voitiin rajata tarkasti hitsauksen kiinnityspinta.

TAULUKKO 1. Sulkupuoliskojen hitsausseamien leveydet

Sulku	Hitsausseaman leveys / mm
DN 20	6
DN 25	6
DN 32	6
DN 40	6
DN 50	6
DN 65	7
DN 80	8
DN 100	8



KUVIO 1. Sulun DN 25 hitsausseaman läpituikutuminen



KUVA 2. Sulun DN 200 hitsaussauman läpätunkeutuminen (Kuva: Niko Finska 2012)

3.3 Käyttö

Poraussulun ainutlaatuisuus on sen käytön mahdollisuus putkihaaroituksissa ilman käyttökatkoksia. Menetelmä on kohdeyritykselle nopeampi ja edullisempi verrattuna tavanomaiseen haaroitusmenetelmään, jossa putkistojen paineet täytyy poistaa ennen asennuksen aloittamista. (Nisso 2011a.)

Poraussulun asennus vaatii asianmukaiset suojavarusteet sekä asennuskokemuksen. Sulun asennus aloitetaan muotoilemalla sulun hitsauspää vastaamaan haaroitettavan putken kaarevuutta. Tämän jälkeen hitsataan sulku kiinni haaroitettavaan putkeen. Vuotojen ehkäisemiseksi sekä tukirakenteen parantamiseksi sulun ja haaroitettavan putken väliin hitsataan tukilaippa. Hitsauksen jälkeen sululle tehdään koeponnistus. Koeponnistuksella tarkastetaan hitsaussaumot sekä poralaitteen tiiviys. Jos vuotoja ilmenee, leikataan sulku irti haaroitettavasta putkesta ja asennustoimenpiteet toistetaan. (TONISCO Jr., 2.)

Kun tiivis rakenne saavutetaan, aloitetaan poraus. Poraaminen tehdään sulkujen asennukseen suunnitellulla poralaitteella. Poralaite kiinnitetään sulun kierteisiin. Poraus aloitetaan tartuntaporalla, minkä jälkeen reikä tehdään reikäsahalla. Porauksen jälkeen pora vedetään taka-asentoon ja sulkuun asennetaan öljyllä voideltu sulkulevy. Sulkulevyn ollessa paikallaan, voidaan pora irrottaa kokonaan sekä uusi haaralinja hitsata sulun päähän. Viimeisessä asennusvaiheessa sulkulevy poistetaan ja sulun levyura hitsataan kiinni. (TONISCO Jr., 2.)

4 STANDARDIT JA DIREKTIIVIT

Poraussulut täyttävät vaatimustenmukaisuusvakuutuksen vuonna 1993 AMPA Hannoverin hyväksyttämislaitoksen myöntämisen mukaisesti, mutta sulut eivät täytä suoraan mitään standardia. Tästä johtuen yritykselle tuli aiheelliseksi luokitella sulut standardien alaisiksi koko tuotannon hyväksyttämiprojektin yhteydessä.

Sulkujen ainutlaatuisesta rakenteesta johtuen sulkujen asettaminen oikeiden standardien ja direktiivien alle oli haastavaa. Haastavuutta toivat standardien ja direktiivien suuret lukumäärät sekä juuri sulkujen rakennetta koskevien määräyksien löytäminen. Monien standardien ja direktiivien perehtymisen jälkeen päädyttiin poraussulut asemoimaan standardin SFS-EN 10025 ja painelaitedirektiivin 97/23/EY alle.

4.1 Standardi SFS-EN 10025

SFS-EN 10025 -standardi käsittelee kuumavalssattuja rakenneteräksiä. Opinnäytetyössä käytetty SFS-EN 10025-2 määrittelee rakenneteräksien toimitusehtoja. Sulkujen lujuusominaisuuksia tarkastellessa piti ottaa huomioon standardin määrittelemä teräksen mekaanisen ominaisuuden muuttuminen nimellispaksuuteen verrattuna. Teräsnimikkeen S355J2G3, jota suluissa DN 20 – DN 100 käytetään, mekaaniset ominaisuudet ovat kirjattuina standardin taulukossa 7 (SFS-EN 10025-2, 42). Taulukosta huomattiin, että S355J2G3-teräksen myötö- ja murtoraja vaihtelevat edellä mainittujen sulkujen tilanteissa 295 MPa:lin ja 325MPa:lin sekä 450 MPa:lin ja 470 MPa:lin välillä nimellispaksuudesta riippuen. Tarkemmat tiedot sulkujen myötö- ja murtorajoista ovat liitteessä 1.

4.2 Painelaitedirektiivi 97/23/EY

Painelaitedirektiiviä sovelletaan sellaisten painelaitteiden ja laitekokonaisuuksien suunnitteluun, valmistukseen ja vaatimustenmukaisuuden arviointiin, joiden suurin sallittu käyttöpaino on yli 0,5 baria (Painelaitedirektiivi 1997, 4).

Poraussulut päädyttiin asettamaan painelaitedirektiivin putkistot -kohdan alle, koska sulut toimivat putkistojen liitoskappaleina sekä haaroittajina. Direktiivi jakaa putkistot ryhmiin paineen ja koon mukaan. Ryhmään 1 kuuluu sulku DN 32 ja ryhmään 2 kuuluvat sulut DN 40 – DN 100. Suluille DN 20 ja DN 25 riittää direktiivin mukaan se, että sulut suunnitellaan ja valmistetaan hyvän konepajakäytännön mukaisesti. Lisäksi sulkujen mukana täytyy olla riittävät käyttöohjeet. (Painelaitedirektiivi 1997.)

Vaatimustenmukaisuusvakuutuksen täyttämiseksi sulut täytyy jakaa moduuliin arviointimenettelyä varten direktiivin mukaisesti. Suluille valittiin moduuliksi D moduuli, joka käsittelee tuotannon laadunvarmistusta (painelaitedirektiivi 1997, 48–50). Kyseinen moduuli valittiin, koska yritys panostaa laatu järjestelmän ylläpitoon. Lisäksi suluille myönnetty CE-merkintä Hannoverissa vuonna 1993 tukee moduulin vaatimuksia.

Painelaitedirektiivi määrittelee painelaitteille tehtäviin hitsausliitoksiin lujuuskertoimet, jotka riippuvat hitsausliitoksen tarkastustavasta. Poraussulkujen hitsausliitoksiin sovellettiin 0,85-lujuuskerrointa, jolloin suluille täytyy tehdä ainetta rikkomaton tarkastus. Ainetta rikkomattomaksi tarkasteluksi sovelletaan poraussuluille tehtävää koeponnistusta, joka hyväksytetään Teknologian tutkimuskeskuksella (VTT) ainetta rikkomattomaksi tarkastukseksi. (Nisso 2012; Painelaitedirektiivi 1997, 32.)

4.3 Sulkujen hitsaaminen

Poraussulut päätettiin jättää hitsausstandardien ulkopuolelle. Sulkujen valmistus- ja asennusvaiheissa tehtävät hitsausliitokset on kuitenkin teetettävä pätevällä henkilöllä ja asiaan kuuluvalla hitsauslaitteistolla, koska hitsaussauman laadulla on merkittävä osa sulun kestävyyydessä (Painelaitedirektiivi, 26). Hitsaussauman merkityksestä käsitellään lisää 6.4-kohdassa.

5 MALLINNUS JA FEM-LASKENTA

5.1 Mallinnus

Sulkujen mallinnuksessa käytettiin CATIA-ohjelmaa (CATIA-ohjelman kotisivu 2012). Valintaperusteina olivat työskentelykokemus kyseisellä ohjelmalla sekä kohdeyrityksen puolto ohjelman valinnalle. Kaikille kahdeksalle sululle oli olemassa työpiirustukset, joiden pohjalta CAD-mallinnus oli mahdollista. Osa työpiirustuksista oli käsin piirrettyjä. Sulut mallinnettiin puolikkaina työpiirustusten mukaisesti, jolloin mallinnettavana oli yhteensä 16 sulkupuoliskoa.

Mallinnus oli tutun ohjelman ansiosta jouhevaa eikä työskentelyssä ilmennyt suurempia ongelmia. Koska sulut noudattivat keskenään samanlaista geometriaa, pystyi seuraavan sulun mallinnuksessa käyttämään edellisen sulun mallia apuna nopeuttamaan työskentelyä. Valmiit sulkupuolikkaat tallennettiin sekä CATIAn omaan CATPart-tiedostomuotoon, että step-muotoon ANSYS-lujuuslaskentaa varten.

Valmiista sulkupuolikkaista tehtiin myös työpiirustukset sähköiseen muotoon tulevaisuutta ajatellen. Työpiirustuksissa käytettiin tavallisia osaleikkaus- ja osasuurennostoimintoja havainnollistamaan lukijaa. Yleistoleranssiksi valittiin ISO 2768-m. Toleranssiluokka m kertoo keskikarkeasta pituusmittojen sallitusta poikkeamasta. Keskikarkeassa luokassa sallitut pituuspoikkeamat sulkujen tilanteissa ovat $\pm 0,1$ mm ja $\pm 0,5$ mm väliltä (SFS-EN 22768-1, 5).

5.2 FEM-laskenta

Lujuuslaskuohjelmaksi valittiin ANSYSin Workbench -ohjelma (ANSYS-ohjelman kotisivu 2012). Valintaperusteina olivat opintojen tuoma työskentelykokemus sekä opettajan puolto kyseiselle ohjelmalle. Koska step -tiedostomuoto ei sisällä mukanaan kierretietoja, lujuuslaskettiin kierrepuolisulku ilman kierteitä. Tällöin kierteiden tilalla käytettiin kierteen sisähalkaisijaa sulun halkaisijana. Sulku mallinnettiin kahtena erillisenä puoliskona, jolloin mallinnustilanne helpottui. Lujuuslaskuissa mallinnettiin kaksi

tilannetta, jotka valittiin niiden kriittisyyksien perusteella. Tilanteet ovat esitelty tarkemmin kohdissa 5.2.3 ja 5.2.4.

5.2.1 Elementtimenetelmän teoria ja käyttö

Elementtimenetelmällä voidaan laskea malliin kohdistuvien kuormitusten aiheuttamia jännityksiä, siirtymiä ja muodonmuutoksia. FEM-malli jaetaan pieniin tarkasteltaviin osiin, elementteihin, joita yhdistää solmupisteet. Tätä kutsutaan elementtiverkoksi. Käytettävä elementin koko ja tyyppi riippuu laskettavasta mallista. Elastinen elementtimalli muuttaa muotoaan siihen kohdistuvan kuorman johdosta pyrkien jälleen tasapainoon. (Hietikko 2004, 148.)

Jokaiselle rakenteen elementille voidaan kirjoittaa tasapainoyhtälöt, jotka yhdistetään yhteensopivuusehtojen avulla solmupisteissä. Mallin materiaaliominaisuuksien ja solmupisteiden koordinaattien avulla muodostetaan kuormitukseen yhdistetty jäykkyyss-matriisi, jolloin saadaan selville solmujen siirtymät. Malliin aiheutuvat jännitykset saadaan laskettua solmupistesiertymien avulla. Yksinkertaisen mallin laskeminen onnistuu käsin käyttäen elementtimenetelmää, mutta monimutkaisemmissa malleissa tietokoneen käyttö on ehdoton edellytys yhtälöryhmäkoon kasvaessa kymmenistä jopa satoihin tuhansiin yhtälöihin. (Hietikko 2004, 148.)

Erilaisten materiaalien lujuustarkasteluihin on kehitelty erilaisia lujuushypoteeseja. Sovellettavia lujuushypoteeseja ovat muun muassa maksimipääjännityshypoteesi (MPJH), maksimileikkausjännityshypoteesi (MLJH), vakiovääristymisenergiyahypoteesi (VVEH) ja sisäisen kitkan hypoteesi (SKH). Edellisistä hypoteeseista hauraan materiaalin käsittelyyn sopii parhaiten MPJH ja sitkeän materiaalin alkavan myödon tarkkailun käsitteelyyn MLJH sekä VVEH. Murtumistarkasteluun soveltuu parhaiten SKH. Saman rakenteen lujuustarkastelusta saadaan eri tulokset riippuen siitä, mitä lujuushypoteesia käytetään. Esimerkiksi MLJH antaa enintään 15 % varovaisemmat tulokset kuin VVEH, kun tarkastellaan alkavaa myötöä. Tässä työssä käytettiin VVEH-hypoteesia. (Outinen, Salmi & Vulli 2007, 344, 347, 349, 352, 355.)

FEM-analyysin rakentaminen aloitetaan joko tekemällä mallinnettava geometria tai tuomalla valmis geometria käytettävään lujuuslaskuohjelmaan. Tämän jälkeen malli

verkotetaan, jolloin valitaan tapaukseen sopiva elementtityyppi ja -koko. Kohtiin, joihin oletetaan vaikuttavan suurimmat muutokset, voidaan tihentää verkkoa. Elementtiteorian peruseriaatteen mukaan tiheämpi verkko antaa tarkemmat tulokset. Elementtiverkon koko täytyy kuitenkin suhteuttaa kappaleen fyysiseen kokoon. (Hietikko 2004, 149.)

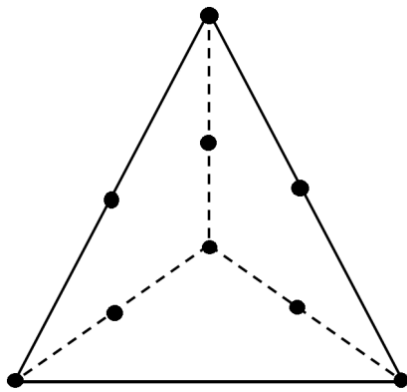
Mallin verkotuksen jälkeen systeemiin luodaan reunaehdot ja kuormitukset. Reunaehtoina ovat malliin tehtävät tuennat, kuten hitsausliitokset ja niveltuennat. Tuennoilla voidaan rajoittaa elementtien ja solmujen liikkumista ja kiertymistä. Malliin tehtävien tuentojen täytyy kuvata todellisia tukiratkaisuja mahdollisimman hyvin. Kuormitusten määrittely voi olla tilanteesta riippuen hankalaa. Tässäkin tilanteessa mallinnetut kuormitukset tulisi kuvata todellisia kuormituksia mahdollisimman realistisesti, jotta tulokset olisivat tarkkoja ja todenmukaisia. Yleisimmät kuormitukset ovat voimasta, paineesta, lämpövaikutuksesta, kiihtyvyydestä ja momentista aiheutuvia kuormituksia. Kuitenkin todellisen tapauksen monimutkaisuudesta johtuen tuentoja ja kuormituksia joudutaan joskus yksinkertaistamaan, jotta lukuuslaskut voitaisiin suorittaa. Siispä tarkinkaan elementtimenetelmä ei takaa täysin todellisia tuloksia. (Hietikko 2004, 149–150.)

FEM-ohjelmaan on syötettävä todellista tilannetta vastaavat materiaaliominaisuudet ennen varsinaista laskentaa. Tällaisia ominaisuuksia ovat muun muassa materiaalin tiheys, kimmokerroin ja Poissonin vakio. Materiaalin myötö- ja murtolujuuksilla ei ole merkitystä laskettaessa mallin venymiä ja jännityksiä lineaarisessa tilanteessa. Epälineaarista materiaalmallia tarvitaan kuitenkin muun muassa plastisoituvan alueen määrittämiseksi. (Hietikko 2004, 150–151.)

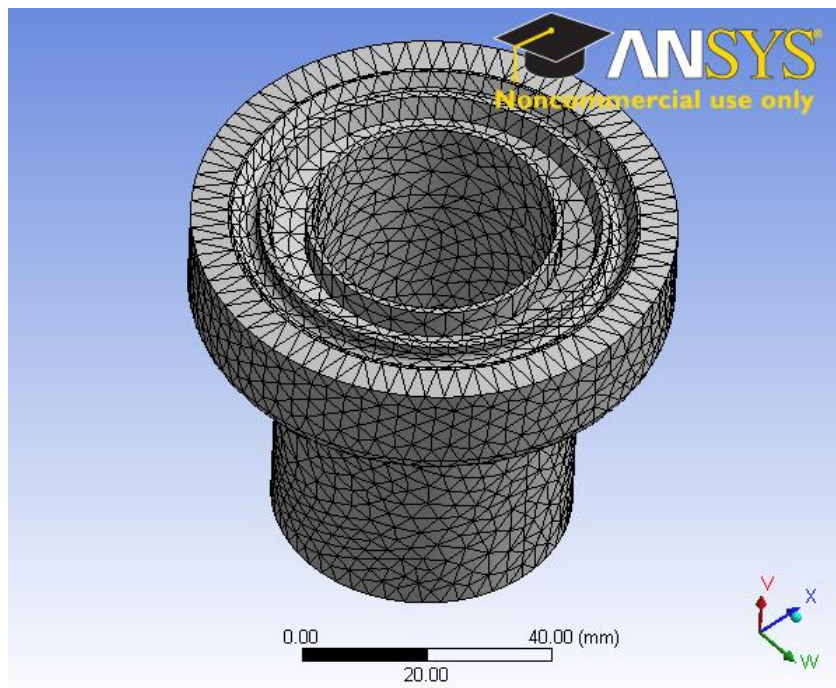
Viimeisenä FEM-analyysin kohtana on tulosten analysointi ja tarkastelu. Yleisimpiä tarkasteltavia arvoja ovat jännitykset, siirtymät ja venymät. Tavallisesti tarkasteltava malli mallinnetaan käyttäytymään lineaarisesti ja staattisesti, jolloin jännitysten on pysyttävä materiaalin suhteellisuusrajan alapuolella. Lineaarisessa mallissa kimmokerroin käyttäytyy vakionomaisesti. Tässä opinnäytetyössä mallinnettiin myös epälineaarinen plastinen malli, jossa kimmokerroin käyttäytyy epälineaarisesti. Plastinen malli joustaa materiaalin myötörajan ylittämässä paikoissa, jolloin tuloksista saadaan todenmukaisemmat. (Hietikko 2004, 151.)

5.2.2 Elementtiverkko

Kaikissa opinnäytetyön elementtilaskutilanteissa käytettiin kvadraattista elementtiä, jossa on kärkisolmujen lisäksi solmut särmien keskellä (kuvio 2). Käytetty elementtityyppi soveltuu ANSYSin tarjoamista elementtityypeistä parhaiten poraussulkujen FEM-malliin tarjoamalla tarkimman tuloksen. Elementin koko valittiin sulun koon mukaan. Käytetyt elementtikoot vaihtelivat 2,5 mm:stä 5,0 mm:iin. Elementtien määrä vaihteli sulusta riippuen 11401 elementin ja 17641 elementin välillä. Verkotuksen tarkennusta ei nähty tarpeelliseksi, koska käytetty elementtiverkko oli suhteellisen pienielementtinen. Kuviossa 3 on DN 40 -sulun elementtiverkko, jossa on 21164 solmua ja 11515 elementtiä elementtikoolla 3,0 mm.



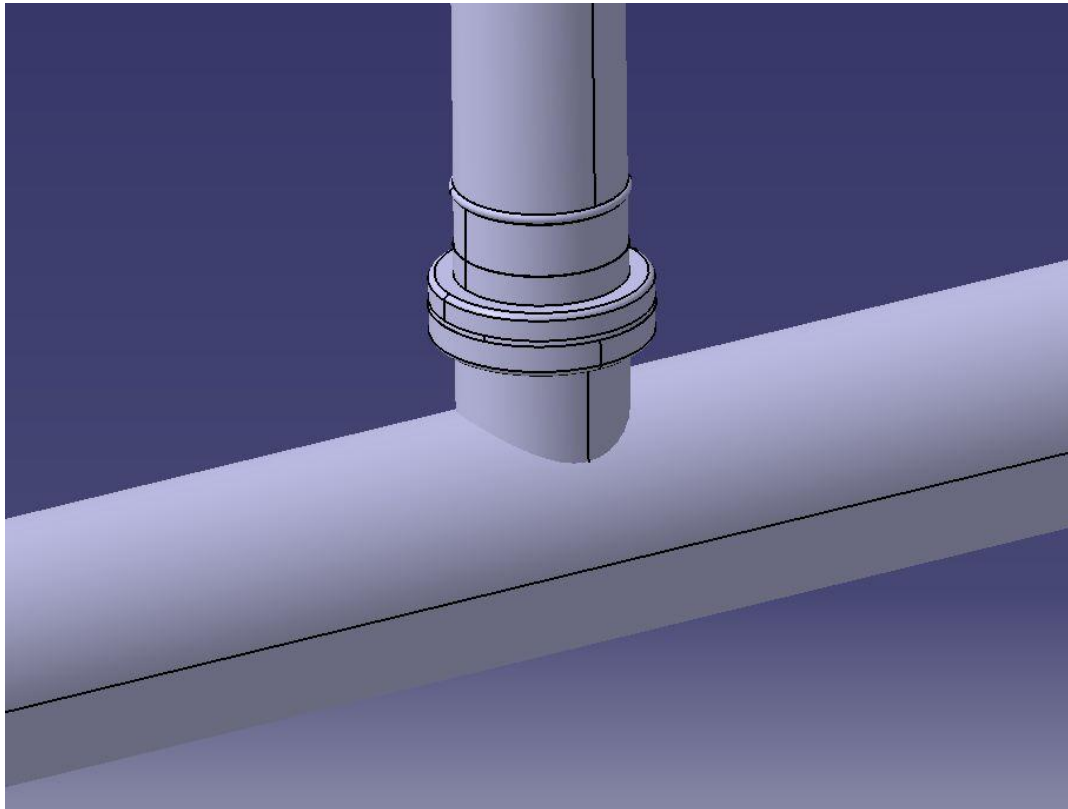
KUVIO 2. Kvadraattinen elementti



KUVIO 3. DN 40 -sulun elementtiverkko

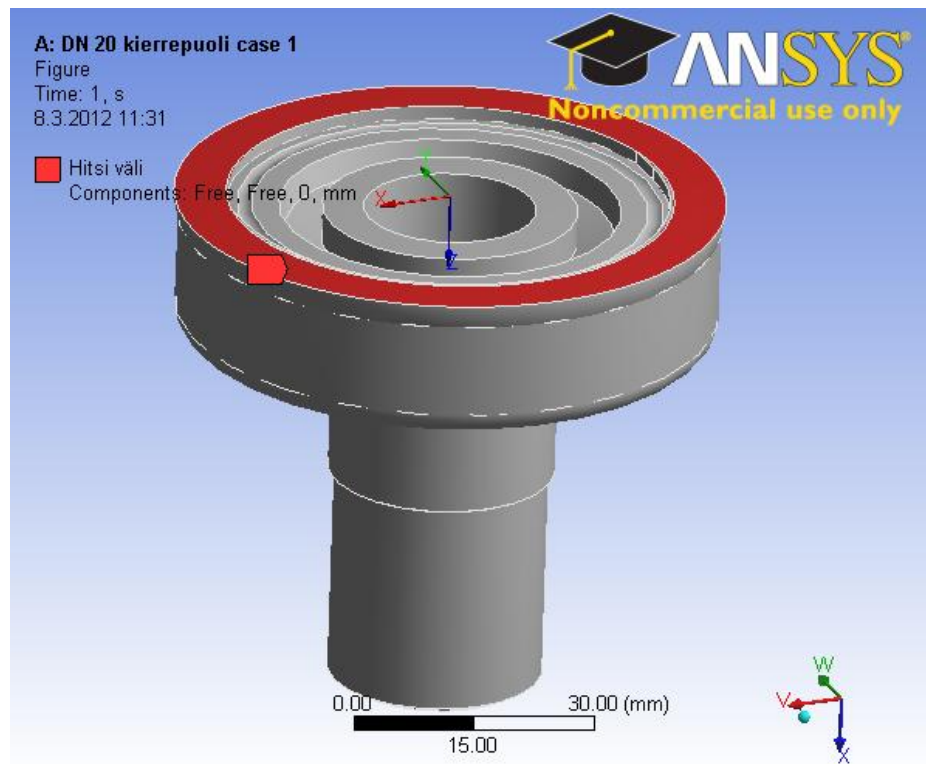
5.2.3 Case 1 -tilanteen tuennat ja kuormat

Case 1 -tilanne kuvaa ympärihitsattua eli käyttövalmista rakennetta, jossa sulun läpi kulkee vapaasti neste 25 barin paineella (kuvio 4). Case 2 -tilanteessa mallinnettiin molemmat sulkupuolikkaat, vaikka niiden geometriassa ei ole suuria poikkeavuuksia. Tilanne oli kuvattu pahimmalla tavalla siten, että sulkujen tiivisteet ovat pettäneet, jolloin lujuuslaskuissa syntyvät suurimmat mahdolliset jännitykset.

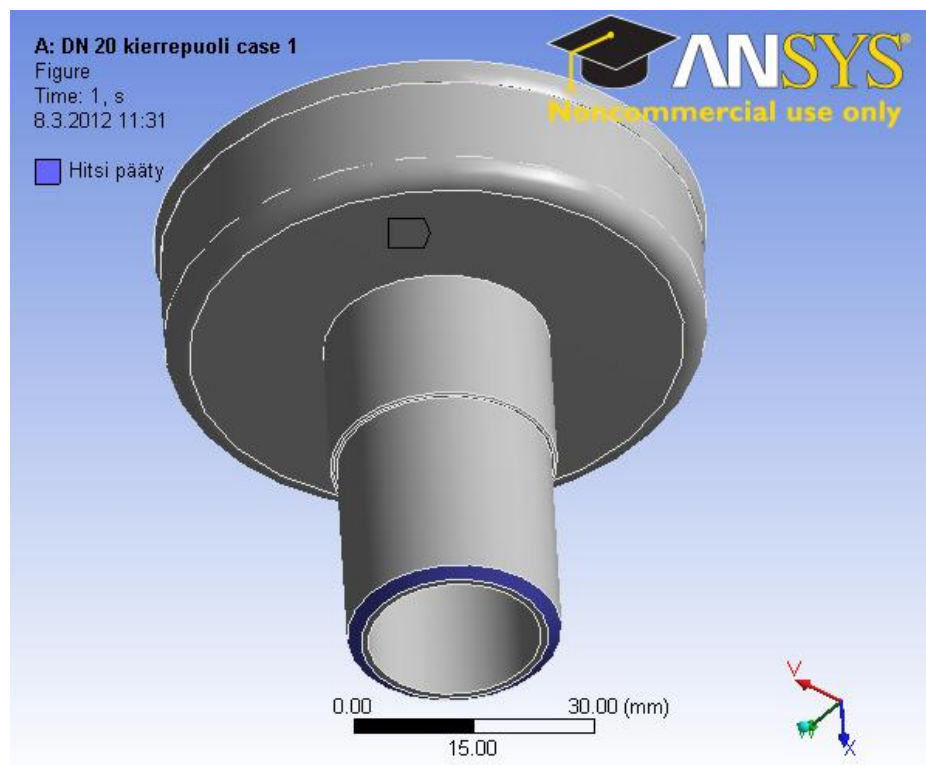


KUVIO 4. Case 1 -tilanne

Koska sulut mallinnettiin puolikkaina, kuvasi niiden välistä hitsausliitosta displacement-kiinnitys (kuvio 5). Kiinnityksessä oli estetty kiinnityspinnan liike pystysuunnassa. Sulun päässä oli fixed support -kiinnitys, joka kuvasi jäykkää hitsausta haaroitettavassa linjassa ja uudessa haaralinjassa (kuvio 6).

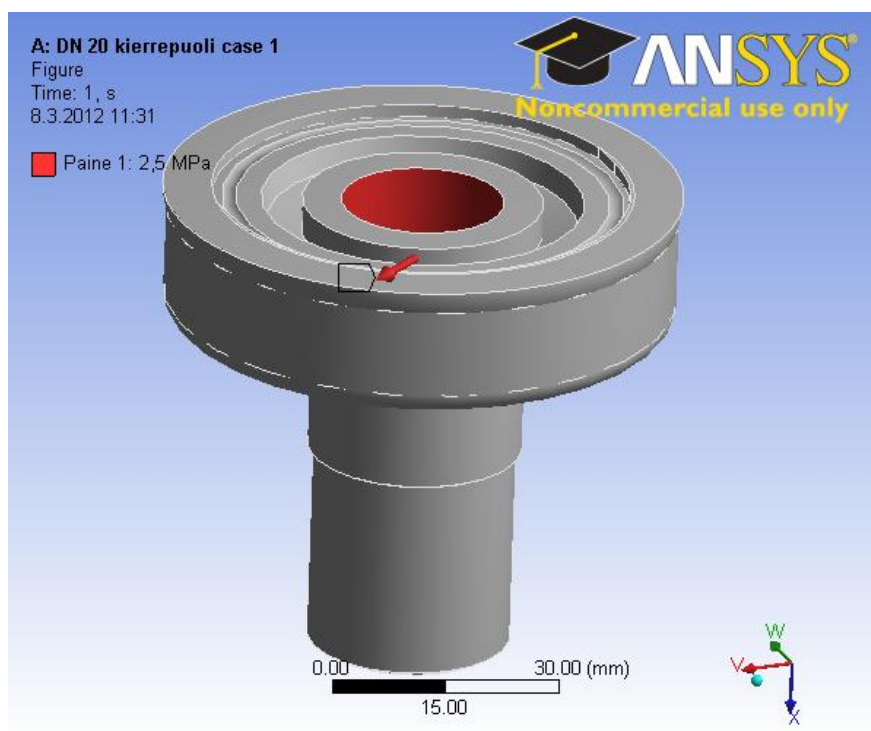


KUVIO 5. Case 1 -tilanteen displacement -kiinnitys

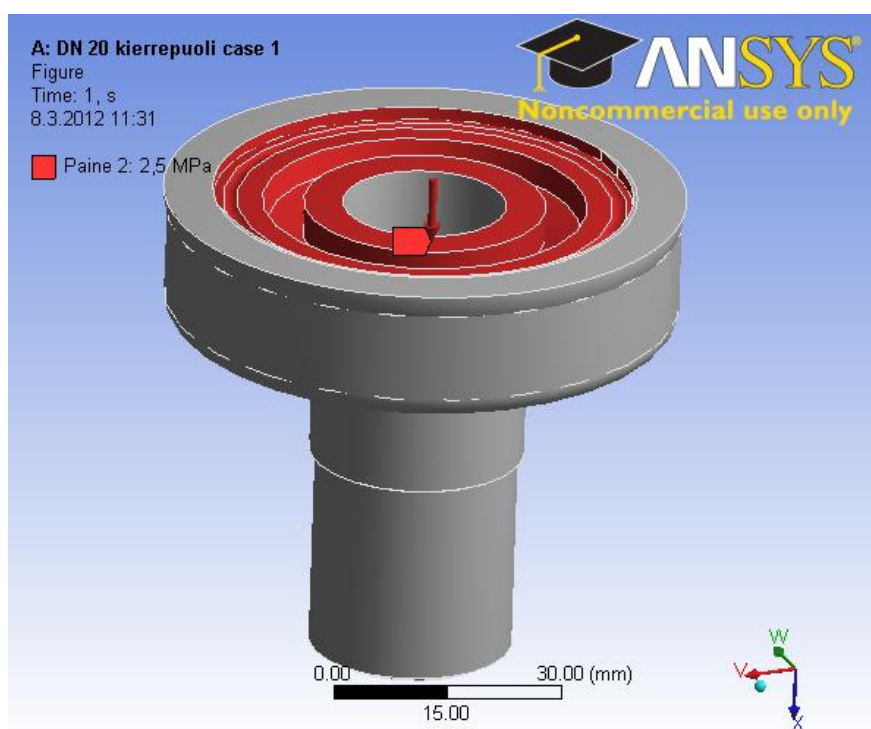


KUVIO 6. Case 1 -tilanteen fixed support -kiinnitys

Sulun sisällä vaikutti 25 barin paine (kuvio 7). Koska tilanne oli mallinnettu siten, että tiivisteet olivat pettäneet, vaikutti paine myös sulun välisosassa (kuvio 8). Paineet kohdistuivat sulun pintaan kohtisuorassa suunnassa.



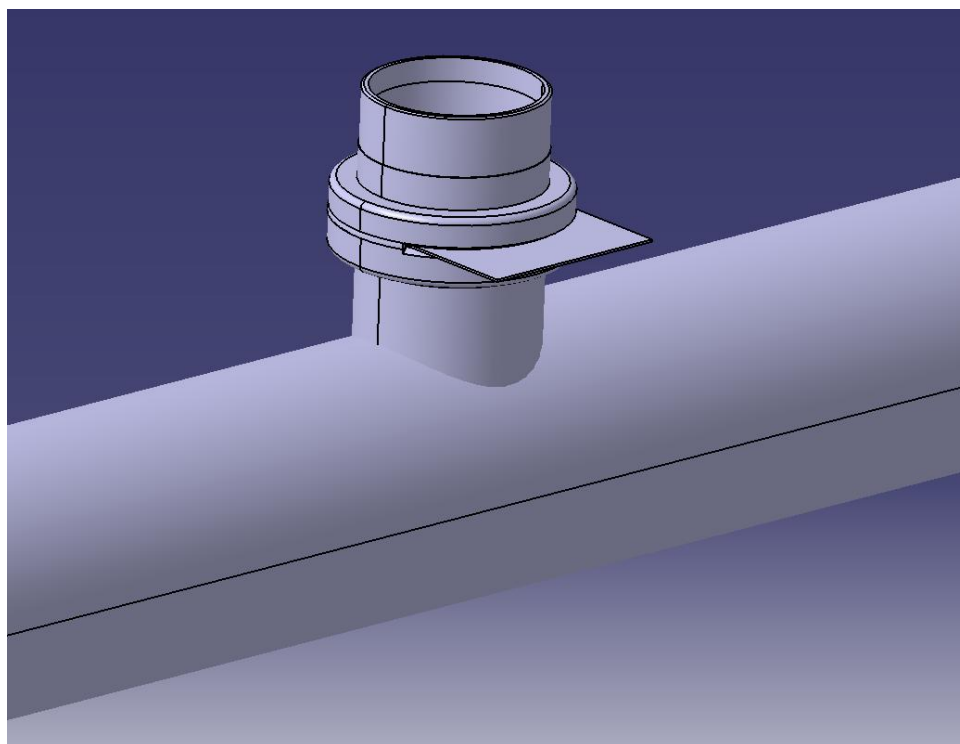
KUVIO 7. Paine sulun keskiosassa



KUVIO 8. Paine sulun välisosassa tiivisteiden pettämisen aiheuttamana

5.2.4 Case 2 -tilanteen tuennat ja kuormat

Case 2 kuvaa tilannetta, jossa poraus oli tehty ja sulkulevy asennettu paikalleen (kuvio 9). Case 2 -tilanteessa tiiviste pitää paineen rajattuna suoran puolen eli alemman sulun sisäseinämällä sekä sulkulevyssä. Tällöin kierrepuolen sulkuun kohdistuu voima (taulukko 2), jonka suuruus on 25 barin paineen ja suoran puolen sulun reiän poikkileikkauksen pinta-alan tulo.

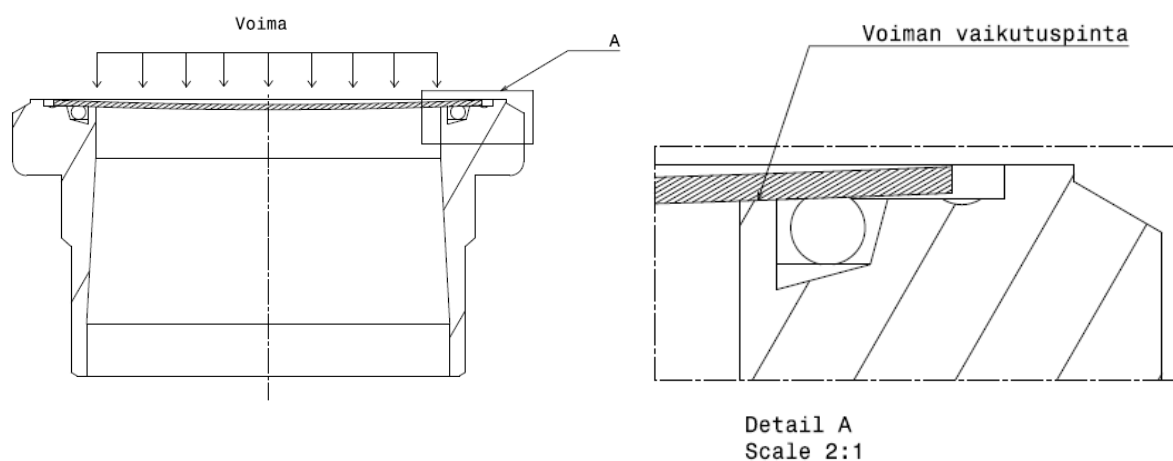


KUVIO 9. Case 2 -sulkulevytilanne

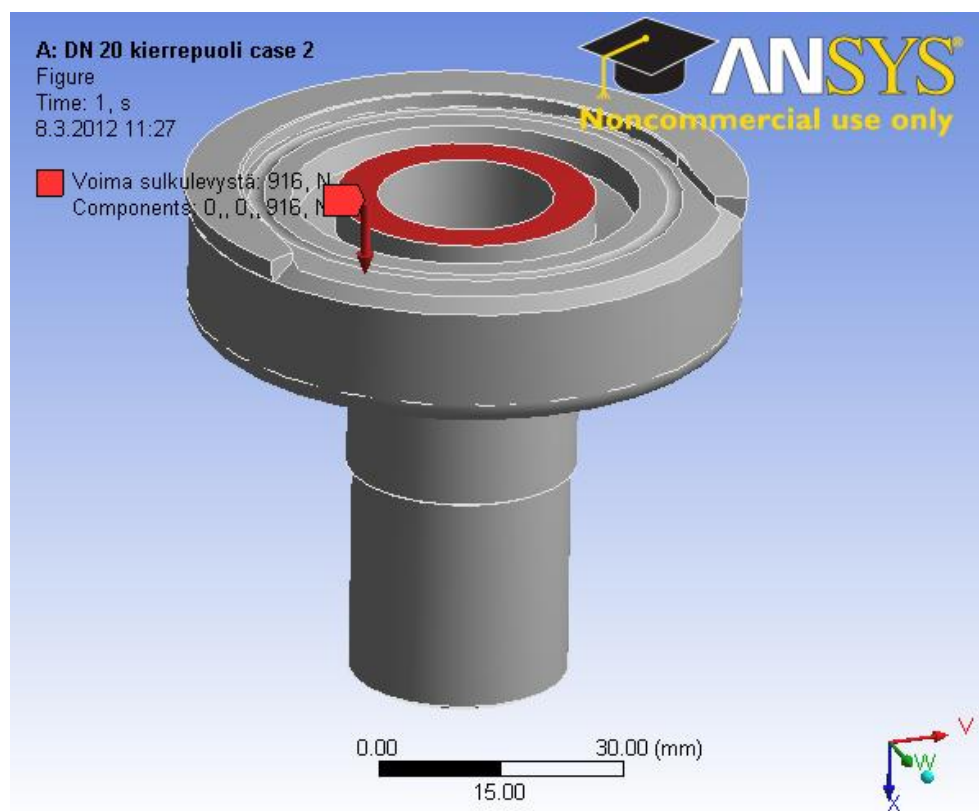
TAULUKKO 2. Sulkulevystä aiheutuvat voimat

Sulku	Reiän A / mm ²	Voima F / N
DN 20	366	916
DN 25	585	1463
DN 32	1018	2545
DN 40	1195	2986
DN 50	1662	4155
DN 65	2827	7069
DN 80	3959	9898
DN 100	7854	19635

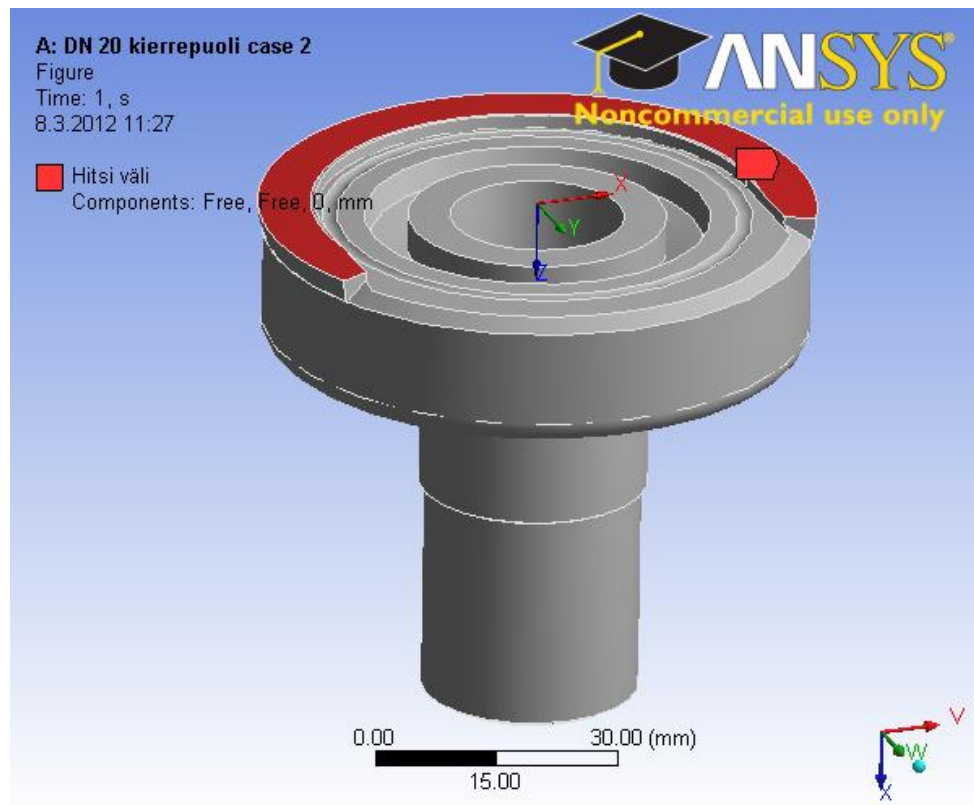
Voima kohdistui kierrepuolen sulun sisärenkaaseen (kuviot 10–11), koska paine aiheuttaa sulkulevyn vääntymisen. Case 2 -tilanteessa lujuuslaskettiin vain kierrepuolen sulku, koska siihen kohdistui sulkulevystä aiheutuva voima. Sulkuun oli mallinnettu displacement-kiinnitys, joka kuvasi hitsausliitosta sulkujen välillä (kuvio 12). Kiinnityksessä oli estetty kiinnityspinnan liike pystysuunnassa.



KUVIO 10. Case 2 -tilanteen voiman kohdistuminen sisärenkaaseen



KUVIO 11. Case 2 -tilanteen voiman kohdistuminen sisärenkaaseen



KUVIO 12. Case 2 -tilanteen displacement -kiinnitys

5.2.5 Jännitykset

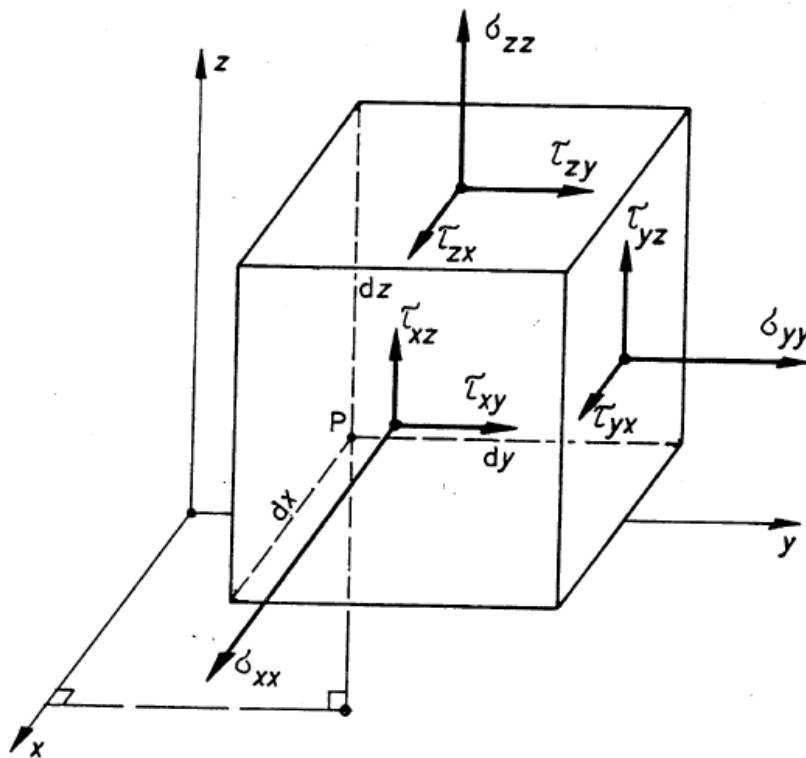
ANSYSista tarkasteltavat jännitykset olivat von-Mises -jännityksiä eli vakiovääristymisenergiähypoteesin (VVEH) avulla laskettuja jännityksiä megapascalina. VVEH soveltuu hyvin sitkeiden materiaalin myötön tarkasteluun (Outinen ym. 2007, 350–351). VVEH:n määrittäminen: ”Materiaali vaurioituu (myötää tai murtuu) sellaisessa pisteessä, jossa sen vääristymisenergiatiheys saavuttaa tälle materiaalille ja vauriotyypille kriittisen arvon.” (Outinen ym. 2007, 349) Paikat, joissa jännitykset ylittivät myötörajan, tapahtui myötöä eli plastista muodonmuutosta. Plastinen muodonmuutos on palautumaton (Outinen ym. 2007, 341).

VVEH-vertailujännitys lasketaan kaavalla 1 (Lähtenmäki 2010, 6), jossa esiintyy normaalijännitys- ja leikkausjännitys-komponentteja. Kaavalla 2 (Lähtenmäki 2010, 6) lasketaan varmuus myötöön, jossa materiaalin myötölujuus jaetaan vertailujännityksellä.

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_x\sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (1)$$

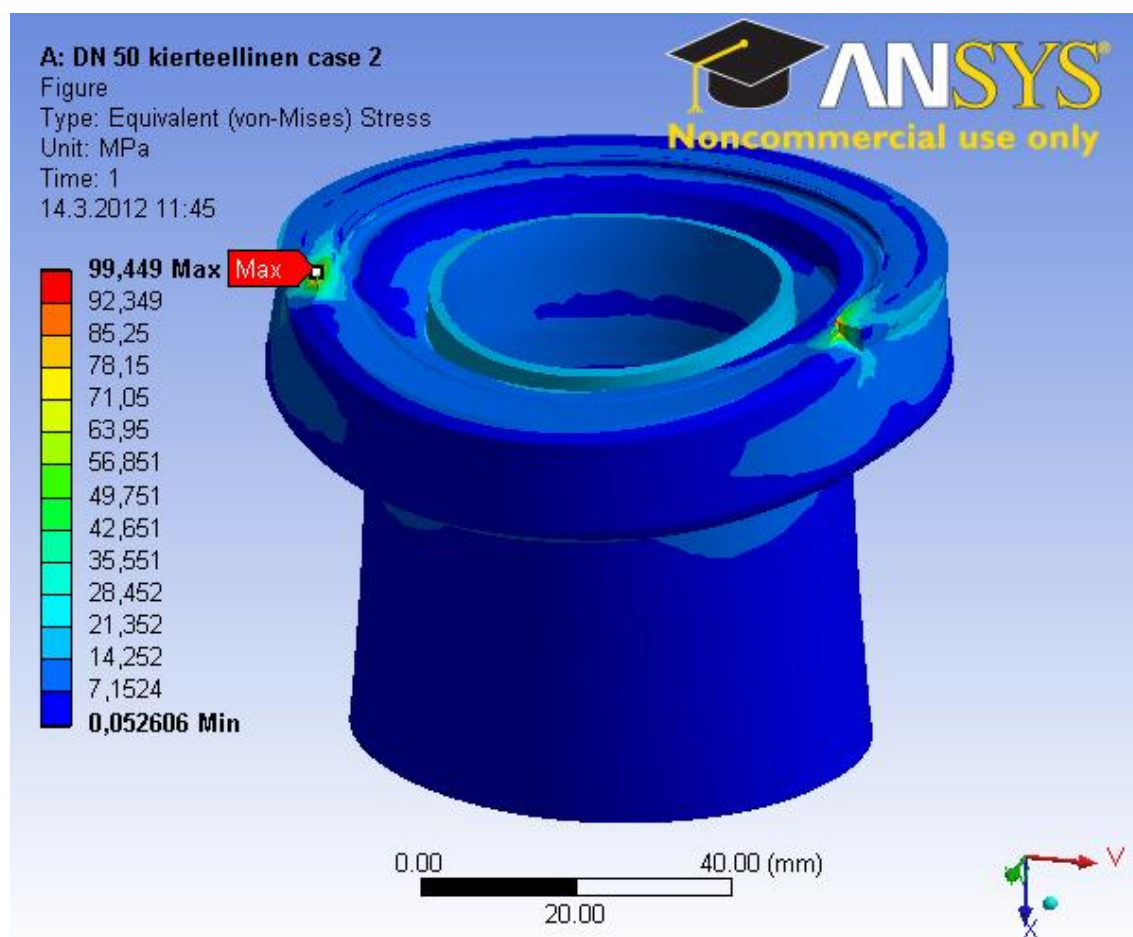
$$n_{VVEH} = \frac{R_e}{\sigma_{vert}} \quad (2)$$

Kaavassa 1 normaalijännityskomponentteja merkitään σ -symbolilla ja leikkausjännityskomponentteja τ -symbolilla. Symbolin ensimmäinen alaindeksi on sen koordinaattiakselin mukainen, joka on kyseisen tahkon normaalin suuntainen. Toinen alaindeksi ilmaisee jännityskomponentin suunnan. Jännityskomponenttien suuntia havainnollistaa kuvio 13. Kaavassa 2 materiaalin myötölujuutta merkitään termillä R_e . (Outinen ym. 2007, 78.)



KUVIO 13. Yleinen jännityselementti (Outinen ym. 2007, 78)

Suurimmat jännitykset kohdistuivat odotetusti hitsausliitokseen, tai sen lähellä olevaan alueeseen. Case 2 -tilanteissa suurimmat jännitykset kohdistuivat poikkeuksetta hitsausliitoksen alku- ja loppupisteisiin sulkulevyn asennusaukon johdosta (kuvio 14). Jännityskuvaajista tarkasteltiin, ylittyykö myötöraja kyseisessä sulussa. Sulkukohtaiset maksimijännitykset varmuuslukuineen ovat liitteessä 1.

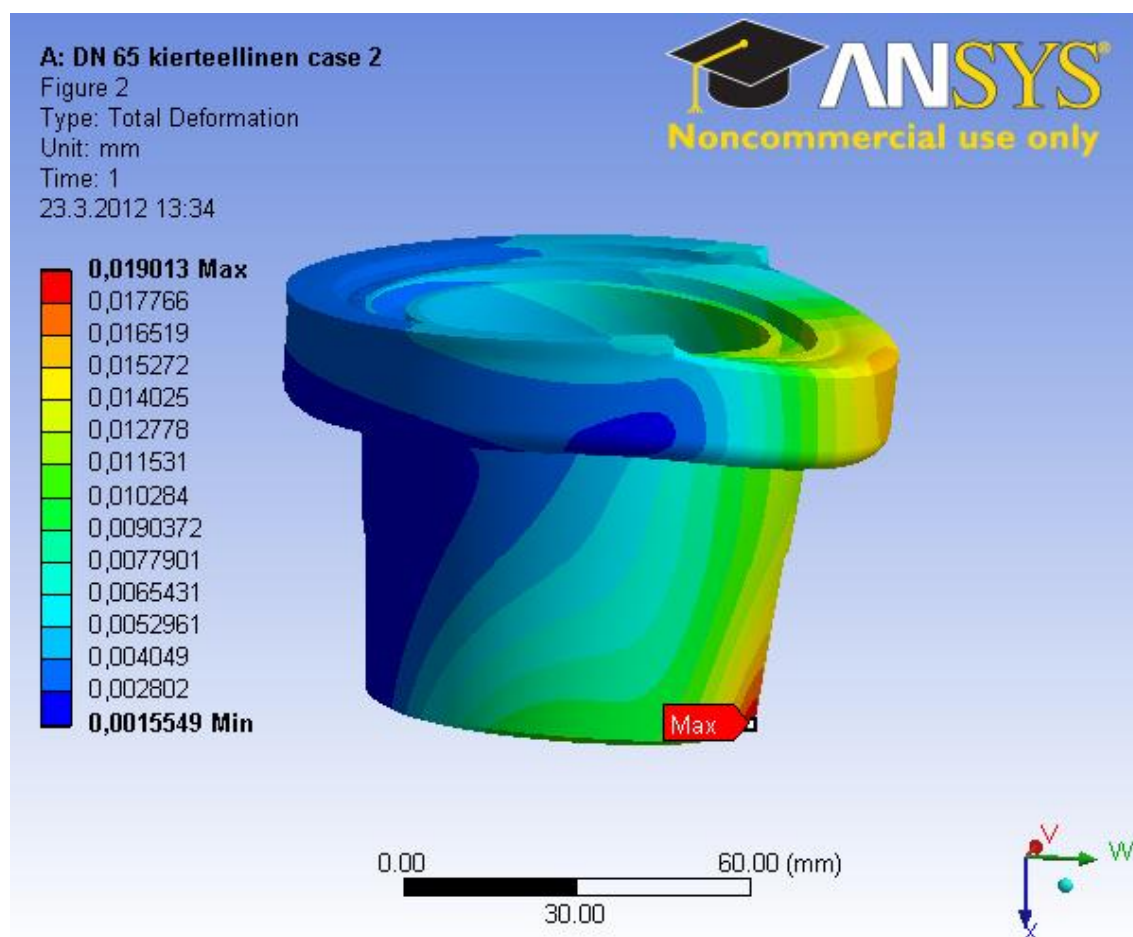


KUVIO 14. Sulun DN 50 kierrepuolen VVEH-jännityskuvaaja case 2 -tilanteessa

5.2.6 Siirtymät

Toinen tarkasteltava kohta oli siirtymät. ANSYS tulosti siirtymäkuvaajat, joista nähtiin sulkuun aiheutuvat siirtymät millimetreissä. Siirtymä oli esitetty kuvaajassa korostettuna, jotta tarkastelija huomaisi sen paremmin. Kuviossa 15 esitetty siirtymäkuvaaja on korostettu 540-kertaiseksi.

Kriittisimmät elastisen siirtymän tarkastelukohdat olivat tiivisteiden alueella. Tiivisteid-
 den alueelta tutkittiin, tapahtuuko sulussa liian suurta siirtymää tiivisteiden pettämisen
 aiheuttamiseksi. Siirtymät tiivisteiden kohdalta sulkukohtaisesti ovat liitteessä 1.



KUVIO 15. Sulun DN 65 kierrepuolen siirtymäkuvaaja case 2 -tilanteessa

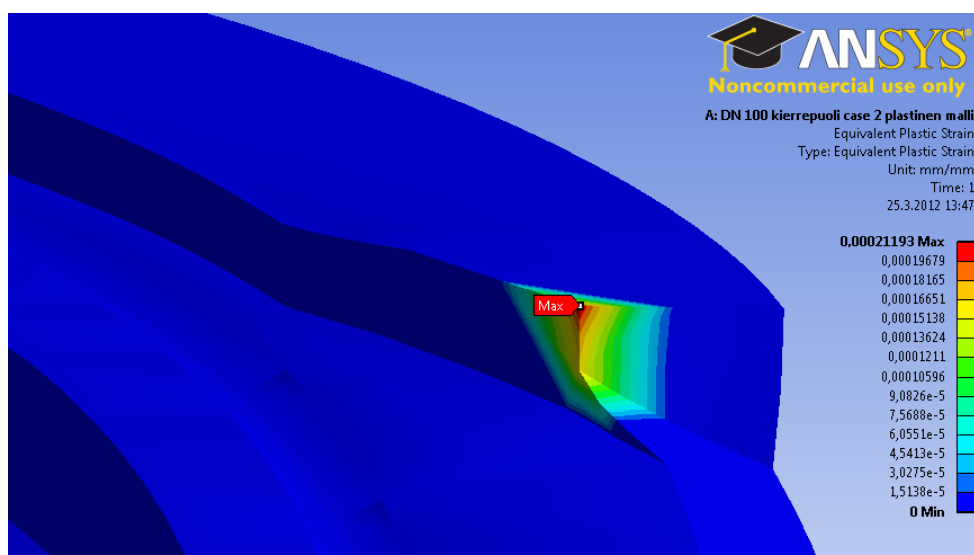
5.2.7 Epälineaarinen analysointi

Kierteellisen sulkupuolen DN 100 case 2 -tilanteen maksimijännityksen myötörajan ylittäminen antoi idean mallintaa sama tilanne epälineaarisella plastisella mallilla. Plastisella mallilla mallintaessa saataisiin paremmin todellisuutta vastaavat venymätulokset eli alueet, joissa tapahtuu plastista muokkautumista eli myötöä. Samalla saataisiin vertailupohjaa, kuinka paljon lineaarisen ja epälineaarisen mallin tulokset eroavat.

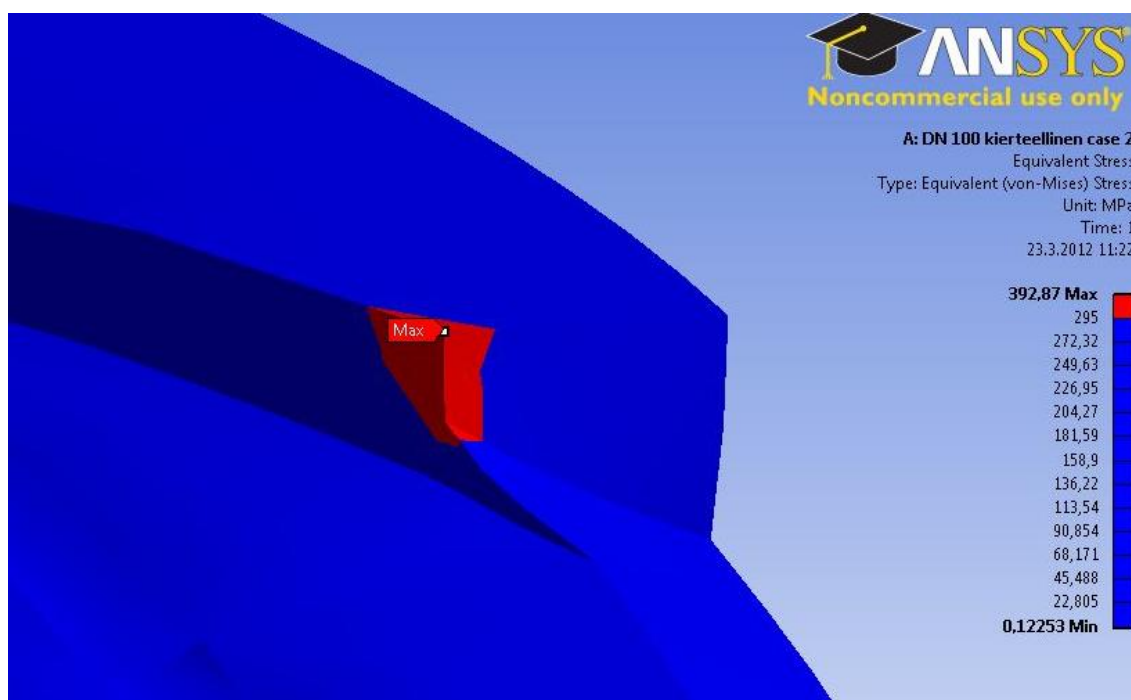
Kierteellisen sulkupuolen DN 100 case 2 -tilanteen plastisessa mallissa käytettiin samaa geometriaa, reunaehdoja ja kuormituksia, kuin lineaarisella mallilla laskettaessa. Ainoat poikkeavuudet koskevat materiaaliominaisuuksia. Plastisessa mallissa käytettiin myötörajana standardin SFS-EN 10025 alennettua 295 MPa:lin arvoa, sekä tangentialmoduulin arvona 921 MPa:lia. Tangentialmoduuli kuvaa materiaalin käyttäytymistä myötörajan ylittymisen jälkeen. Tangentialmoduuli laskettiin käyttämällä alennettua myötörajaa 295 MPa:lia ja murtorajaa 450 MPa:lia, sekä teräksen murtovenymää, jonka arvona käytet-

tiin standardin mukaista 17 % arvoa (SFS-EN 10025-2, 42). Plastisen mallin lujuuslaskutuloksista tarkasteltiin plastisia venymiä ja jännityksiä.

Kuviossa 16 on kierrepuolen sulun DN 100 case 2 -tilanteen plastinen muodonmuutos laskettuna epälineaarisella plastisella mallilla. Plastinen muokkautuminen näkyy sinisestä poikkeavalla värillä. Kuviossa 17 on laskettuna sama tilanne lineaarisella mallilla. Kuviossa on punaisella 295 MPa:lin ylittävät jännitykset eli alueet, joissa tapahtuu plastista muokkautumista. Molemmat kuviot kuvaavat samaa hitsausaamaa, joka on ympyröitynä kuviossa 18. Kuvioita 16 ja 17 keskenään vertaamalla todetaan, että epälineaarisella mallilla lasketut plastiset muodonmuutokset rajautuvat laajemmalle alueelle kuin lineaarisella mallilla (myötörajan ylittävät jännitykset.)



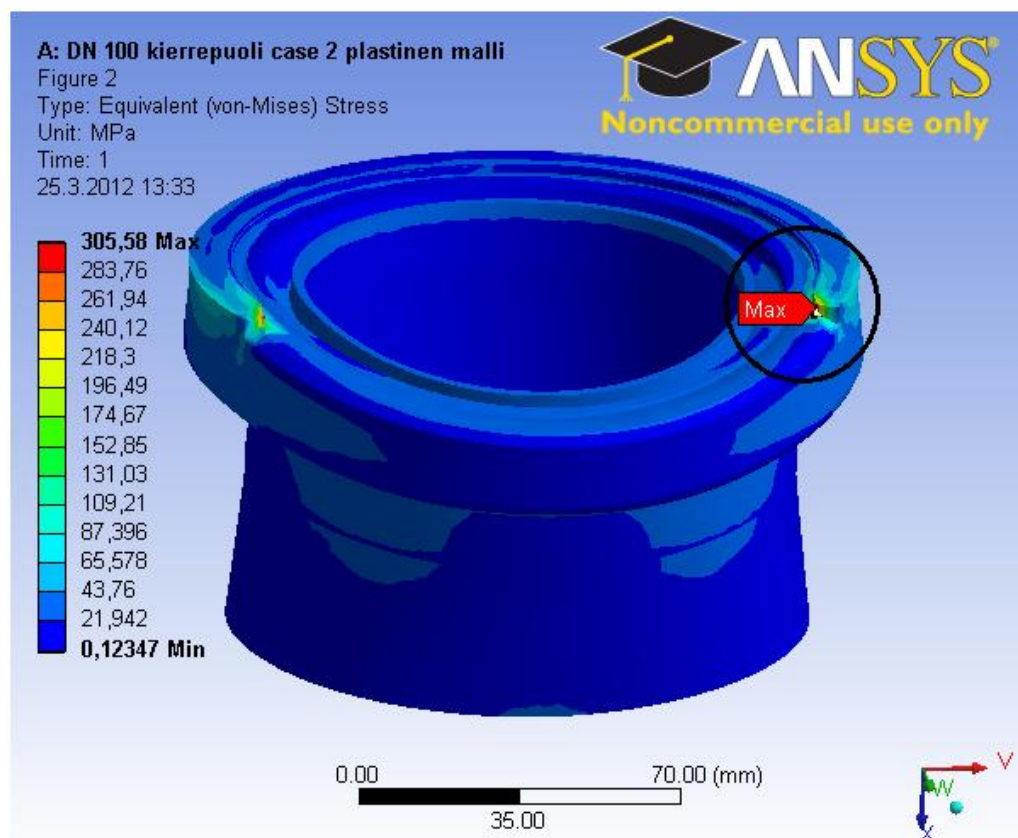
KUVIO 16. Sulun DN 100 kierrepuolen case 2 -tilanteen plastinen muodonmuutos epälineaarisella mallilla laskettuna



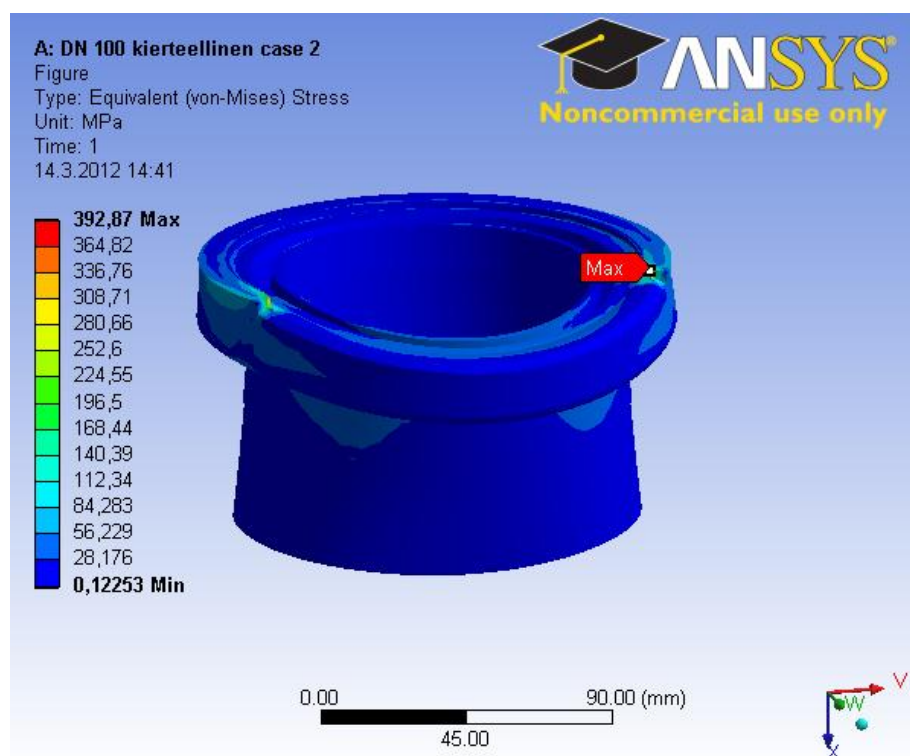
KUVIO 17. Sulun DN 100 kierrepuolen case 2 -tilanteen plastinen muodonmuutosalue lineaarisella mallilla laskettuna

Kuviossa 18 on kierrepuolen sulun DN 100 case 2 -tilanteen jännityskuvaaja laskettuna epälineaarisella plastisella mallilla. Maksimijännitykseksi muodostuu 306 MPa:ia hit-saussauman päätyosaan. Kuviossa 19 on laskettuna sama tilanne lineaarisella mallilla maksimijännityksien ollessa 393 MPa:ia. Noin 20 % ero on selitettävissä plastisen mallin käyttäytymisellä. Plastinen malli joustaa jännityksen huippupisteissä, jolloin huippujännitykset tasaantuvat laajemmalle alueelle. Plastisen mallin tulokset ovat todenmukaisemmat kuin lineaarisella mallilla lasketut tulokset (Hietikko 2004, 150–151).

Lineaarisen ja epälineaarisen mallin siirtymäkuvaajat ovat lähellä toisiaan. Maksimisiirtymien tulokset vastaavat toisiaan neljän desimaalin tarkkuudella. Tämä osaltaan näyttää sen, miten vain pieni osa mallista kokee pysyviä muodonmuutoksia.



KUVIO 18. Sulun DN 100 kierrepuolen case 2 -tilanteen jännityskuvaaja epälineaarisella mallilla laskettuna

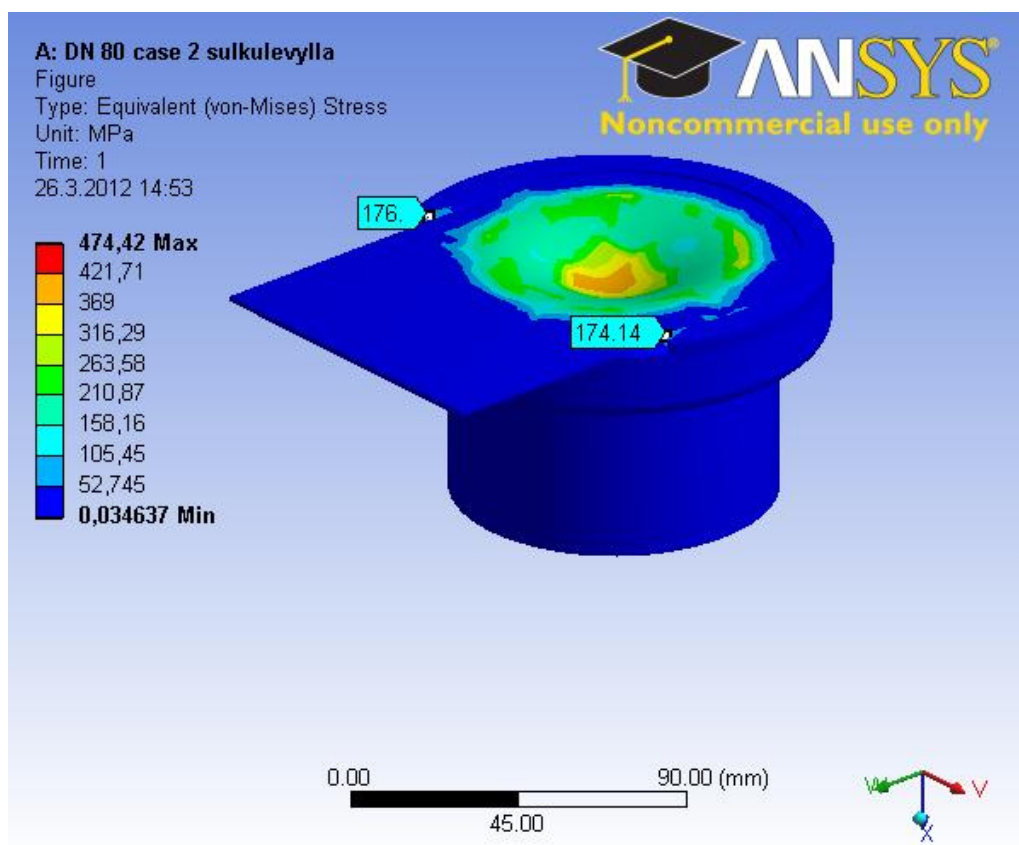


KUVIO 19. Sulun DN 100 kierrepuolen case 2 -tilanteen jännityskuvaaja lineaarisella mallilla laskettuna

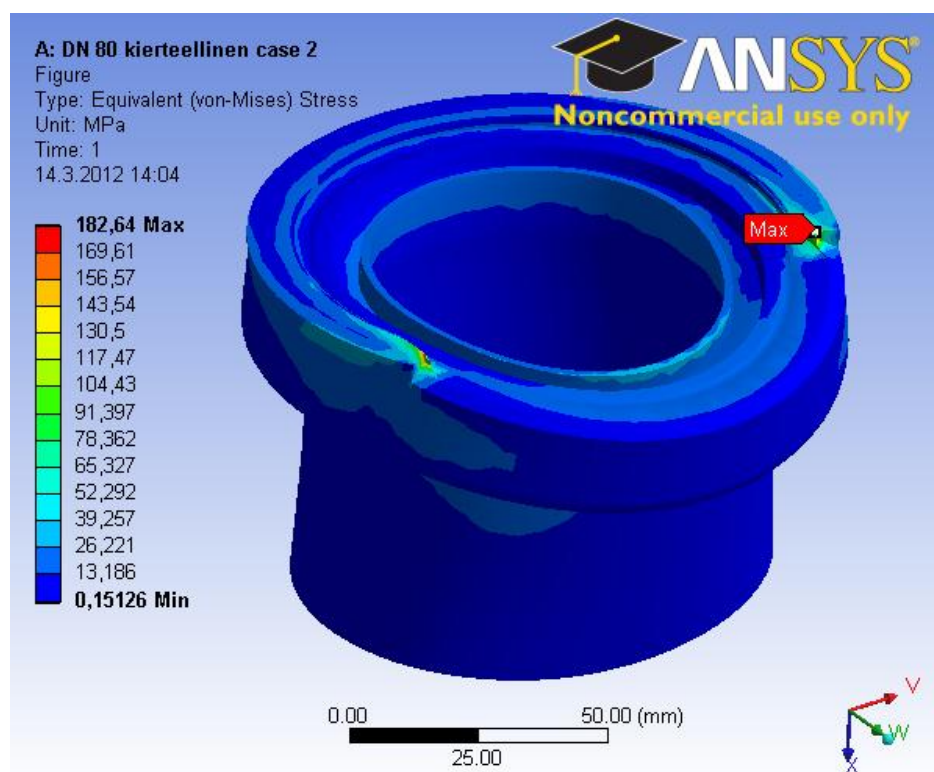
5.2.8 FEM-mallinnus kokoonpanolla ja CATIalla

FEM-mallinnus toteutettiin myös kahtena erilaisena kokoonpano-tyylisenä mallinnuksena, jolloin saadaan vertailupohjaa tuloksille. Kokoonpanot mallinnettiin sekä ANSYS:illä että CATIA:lla.

ANSYS:in kokoonpanomallinnuksessa (kuvio 20) kierrepuolen sulun DN 80 case 2 -tilanteen sulun päälle tuotiin sulkulevy, jonka vahvuus on 1,5 mm. Sulkulevyyn mallinnettiin tiivisteiden rajaaman kokoinen pinta, johon kohdistettiin 25 barin paine. ANSYS:in probe-työkalulla haettiin maksimijännitykset, jotka muodostuivat odotetusti hitsaussaumaan. Maksimijännitykseksi muodostui 176 MPa:lia. Kuviossa 21 on mallinnettuna saman sulun jännityskuvaaja yksinkertaistettuna ilman sulkulevyä, jolloin maksimijännitykseksi muodostui hitsaussaumaan 183 MPa:lia. Näiden kahden tapauksen tulokset eroavat 4 %.

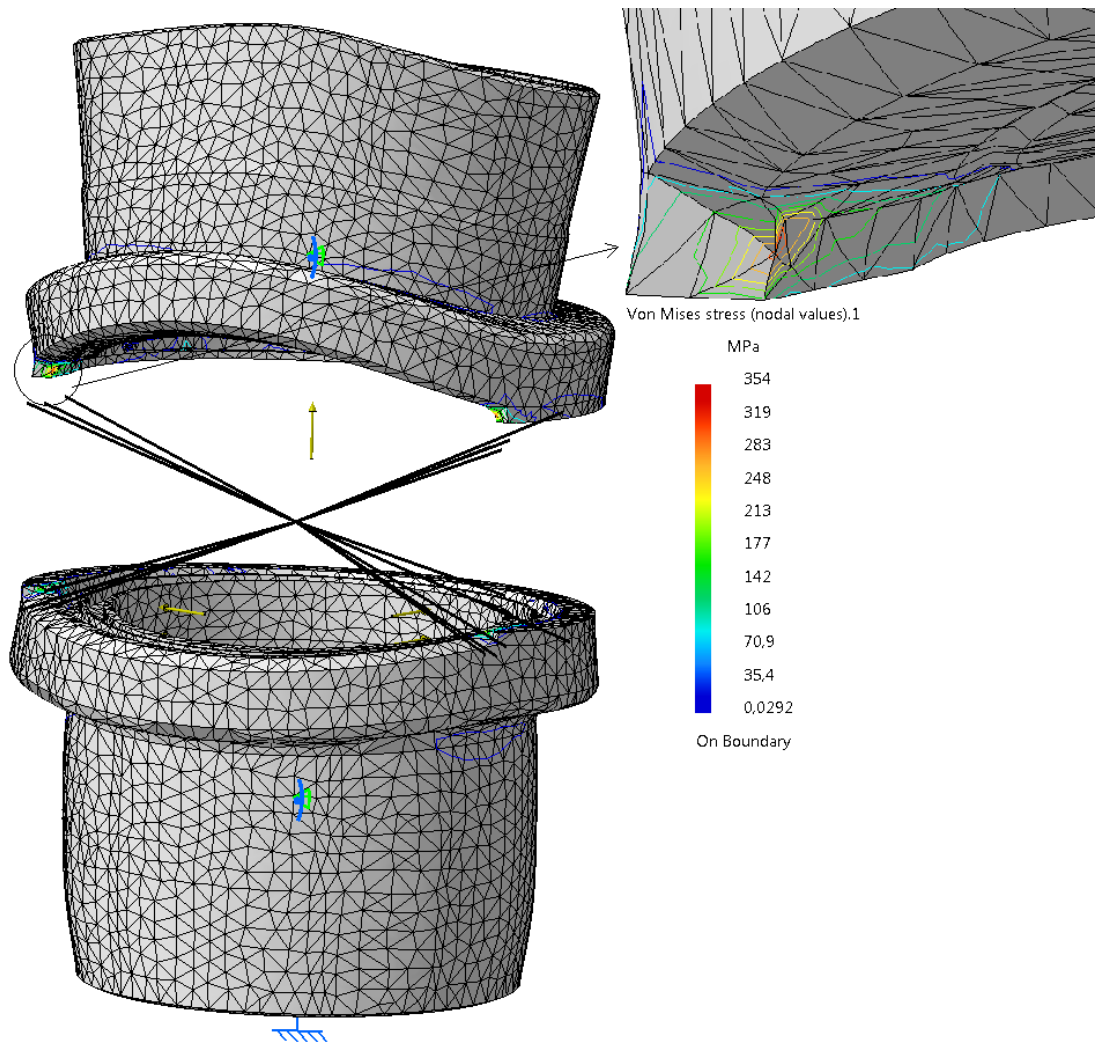


KUVIO 20. Sulun DN 80 kierrepuolen case 2 -tilanteen jännityskuvaaja käyttäen kokoonpanoa



KUVIO 21. Sulun DN 80 kierrepuolen case 2-tilanteen jännityskuvaaja

CATIA:lla mallinnettiin DN 100 case 2 -kokoontulo (kuvio 22), jossa on sekä sulun suora- että kierrepuoli. Alapuolen suoran sulkupuoliskon pätyyn laitettiin clamp-kiinnitys, joka kuvaa jäykkää hitsausliitosta haaroitettavassa putkessa. Sulkujen välillä on rigid-kiinnitys, joka kuvaa sulkujen välistä hitsausliitosta. Suoran sulkupuoliskon sisäseinämällä vaikuttaa 25 barin paine sekä kierrepuolen sulun sisärenkaaseen vaikuttaa 19636 N:in voima. Maksimijännitykset kohdistuvat odotetusti hitsausseamille. Maksimijännitykseksi muodostui 354 MPa:ia. Kuviossa 18 näkyvän kierrepuolen sulun DN 100 case 2 -tilanteen maksimijännitykseksi muodostui 393 MPa:ia. Näiden kahden tapauksen tulokset eroavat 10 %.



KUVIO 22. DN 100 case 2 -tilanteen jännityskuvaaja CATIalla käyttäen kokoonpanoa

6 TULOKSET

6.1 Standardisointi

Poraussulut asemoitiin SFS-EN 10025 ja painelaitedirektiivin 97/23/EY alle. Standardi SFS-EN 10025 määrittelee sulkujen materiaaleille myötö- ja murtorajat nimellispaksuuteen nähden. Tarkemmat tiedot sulkujen myötö- ja murtorajoista ovat liitteessä 1.

Painelaitedirektiiviä sovelletaan sellaisiin painelaitteisiin, joissa suurin sallittu käyttö-paine on suurempi kuin 0,5 baria. Painelaitedirektiivi määrittelee sulkujen hitsausliitoksiin lujuuskertoimen 0,85. Käytetty kerroin vaatii sen, että suluille tehdään materiaalia rikkomaton aineentarkastus. Suluille valittiin D-moduuli vaatimustenmukaisuusvakuutuksen täyttämiseksi. D-moduuli käsittelee tuotannon laadunvarmistusta.

6.2 Maksimijännitykset ja -siirtymät

ANSYS:in VVEH-jännityskuvaajista etsittiin sulkujen maksimijännitykset, joita verrattiin sallittuihin myötörajoin. Sallitun myötörajan suuruus riippui sulun nimelliskoosta sekä maksimijännityksen sijainnista. Hitsausaumoissa oleviin jännityksiin käytettiin painelaitedirektiivin 0,85-lujuuskertoimella olevaa sallittua jännitysrajaa. Muualla sulussa sijaitseviin maksimijännityksiin käytettiin standardin SFS-EN 10025 mukaista alennettua myötörajaa.

Maksimijännityksien sijainnit vaihtelivat hieman sulusta ja tapaustyyppistä riippuen. Case 1 -tilanteessa maksimijännityksien sijainnit olivat joko sulkuja yhdistävässä hitsausliitoksessa (kuvio 5) tai sulun päätyhitsausliitoksessa (kuvio 6). Case 2 -tilanteessa maksimijännitykset olivat poikkeuksetta sulkuja yhdistävässä hitsausliitoksessa (kuvio 18). Case 2 -tilanteen maksimijännityksien sijainti oli odotettavissa geometrian perusteella, koska jännitykset kasaantuvat yleensä epäjatkuvuuskohtiin. Sulkulevystä aiheutuva voima pyrkii repimään sulkuja erilleen, jolloin sulun avonaisen sivun reunat ovat alttiita suurille jännityksille. Jännityshuippujen kohdalla oli terävä kohta geometriassa, johon jännitykset yleisemmin kasaantuvat. Sallittu myötöraja ylittyi ainoastaan kierrepuolen

sulun DN 100 case 2 -tilanteessa. Sulkukohtaiset maksimijännitykset ja varmuusluvut näkyvät liitteessä 1.

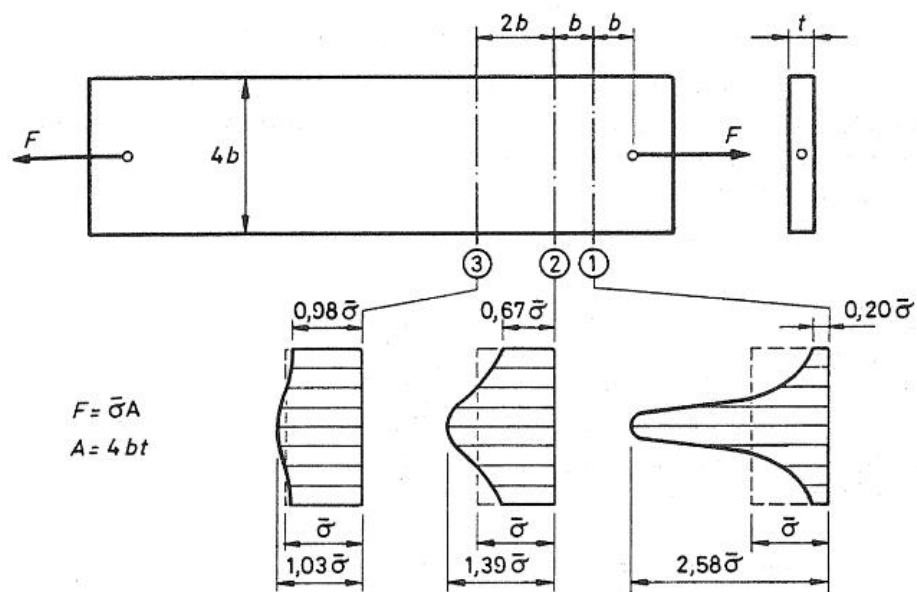
Vaikka kierrepuolen sulun DN 100 case 2 -tilanteessa maksimijännitykset ylittivät sallitun myötörajan, ei sulussa tapahdu kriittistä muokkautumista. Edellä mainittu tilanne mallinnettiin plastisella mallilla, jossa myötäminen näkyy kohdistuvan pienelle alueelle hitsaussaumassa (kuvio 16). Hitsaussaumassa olevat huippujännitykset eivät nouse lähelle murtorajaa, jolloin hitsausliitos pitää sulut kiinni toisissaan asennusvaiheessa. Sulun rakenteessa ei myöskään tapahdu tiivisteiden läpi vuotamista, koska suurin siirtymä tiivisteiden kohdalla oli 0,06 mm. Tiivisteet ovat asennusvaiheessa noin 0,4–0,6 mm:in puristuksissa (Nisso 2011b). Asennusvaiheen viimeisessä vaiheessa sulkua ympäröi hitsaus, jolloin mahdolliset muodonmuutokset sulautuvat hitsaussaumaan tehden sulusta tiiviin ja kestävä. Liitteessä 1 on kerrottu sulkujen tiivistekohdan siirtymät tapauskohtaisesti.

Mallinnuksen geometriasta johtuen maksimijännitykset kasaantuvat suurena määränä hitsaussauman alku- ja loppupisteisiin. Todellisuudessa hitsaussaumaan ei muodostu samanlaisia teräviä kohtia kuten mallissa johtuen hitsaustekniikasta, vaan hitsaussaumamat ovat pyöreämpiä kuin käytetyssä mallin geometriassa. Kuvassa 3 näkyy sulun DN 25 hitsaussauman todellinen geometria.

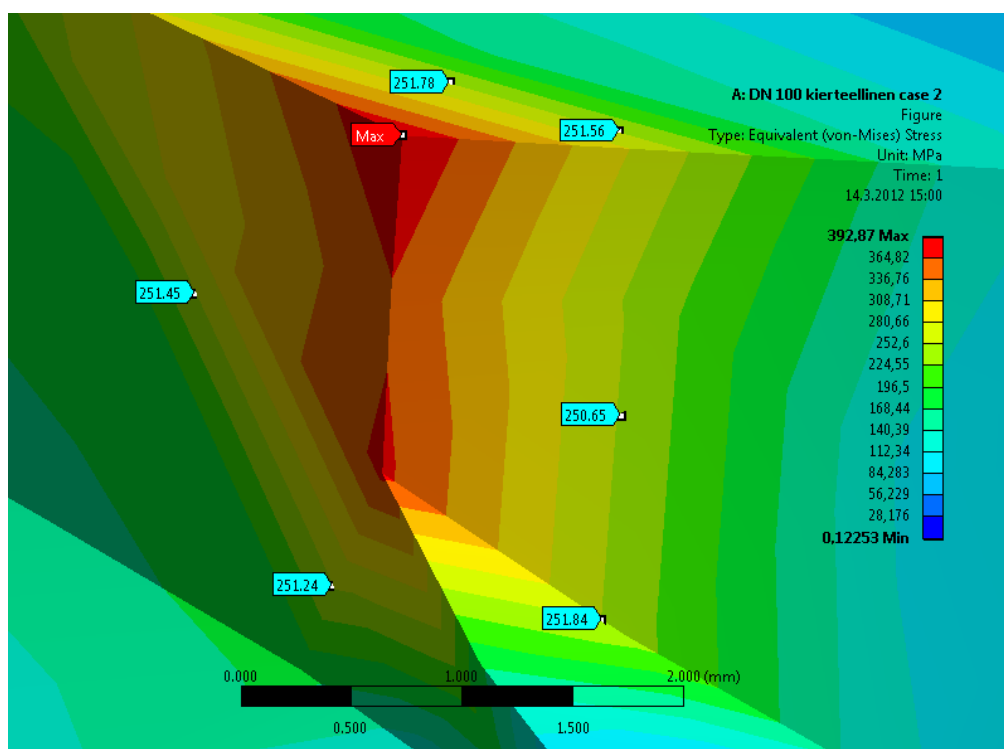


KUVA 3. Sulun hitsaussauman todellinen geometria (Kuva: Niko Finska 2012)

Hitsaussauman geometrian tarkasteluun voidaan soveltaa myös Saint VENANT'n periaatetta. Saint VENANT'n periaatteen mukaan mallin poikkileikkaukset ja normaalijännitykset vaimenevat äkillisesti, kun etäännyttään vaikutuspisteen läheisyydestä (Outinen ym. 2007, 133). Sulkuja yhdistävää displacement -kiinnitystapaa voidaan ajatella vaikutuspisteenä. Kuviossa 23 nähdään, kuinka jännityshuiput ovat tasaantuneet jo muutaman tyypillisen mitan päässä vaikutuspisteestä (Outinen ym. 2007, 133). Lineaarisella mallilla lasketun kierrepuolen sulun DN 100 case 2 -tapauksessa jännityshuippu tasaantuu sallitulle myötörajan tasolle 2–3 mm päässä vaikutuspisteestä (kuvio 24). Vastaavasti plastisella mallilla jännityshuiput tasaantuvat jo 1–2 mm päässä vaikutuspisteestä.



KUVIO 23. Saint VENANT'n periaatteen toteutuminen (Outinen ym. 2007, 133)



KUVIO 24. Sulun DN 100 kierrepuolen case 2 jännityksien tasaantuminen

Plastisen mallin tarkastelun, geometriavirheen, huippujännitysten paikallisuuden ja Saint VENANT’*n* periaatteen avulla voidaan päätellä, että sulun DN 100 kierrepuolen case 2 -jännityshuiput eivät ole kriittisiä, vaan jännitykset kasaantuvat geometriassa epäjatkuvuuskohtiin. Jännityshuipun kohdalla materiaali käyttäytyy venymäohjatusti, koska ympärillä oleva materiaali joustaa jännityshuippukohdan kanssa (Airila ym. 2009, 65). Näin huippujännitykset tasaantuvat sitkeässä materiaalissa laajemmalle alueelle, jolloin sulkuun ei aiheudu toiminnallisia haittoja (Outinen ym. 2007, 382).

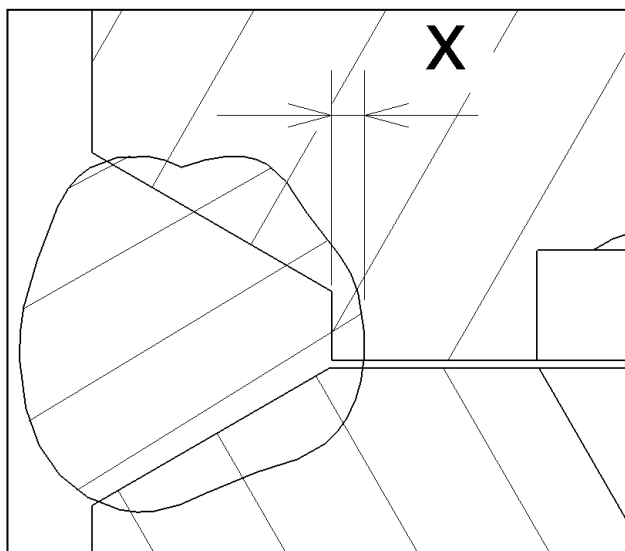
6.3 Hyväksyttämistarkastelu-raportit

Poraussulkujen hyväksyttämistarkastelua varten tehtiin FEM-laskennasta sulkukohtaiset lujuusraportit. Lujuusraportit ovat ANSYS:ista tulostetut englanninkieliset raportit, joissa selviää kaikki lujuuslaskuihin liittyvät tiedot. Raportissa on kerrottu mallin geometria, verkotus, reunaehdot, kuormitukset, VVEH-jännitykset ja siirtymät kuvineen ja tau-lukkoineen. Raportit on tehty jokaisesta sulun tilanteesta, joten raportteja on yhteensä 24 kappaletta. Lisäksi raportin loppuun on tehty yhteenveto sanalliseen, helposti luettavaan muotoon suomen kielellä. Jokaisesta sulusta on tehty myös tuotekortti, jossa on yhteenveto eri tilanteiden raporteista. Tuotekortissa on kerrottu käytetyn elementin tie-

dot, sallitut jännitykset, maksimijännitykset, siirtymät tiivisteiden kohdalta, varmuusluvut myötörajaan nähden sekä käytetyt standardit ja direktiivit. Lisäksi tuotekortin lopussa on jännitys-paine-kuvaaja, josta näkee graafisesti tilannekohtaisesti sulun käyttäytymisen paineen alaisena. Opinnäytetyössä on liitteenä vain yksi kokonainen sulkuraportti esimerkin omaisesti johtuen niiden suurista sivumääristä. Kaikki tekninen materiaali toimitetaan kokonaisuudessaan kohdeyritykselle sähköisenä. Liitteissä 2–4 ovat sulun DN 40 hyväksyttämöraportit sekä liitteessä 5 sulun DN 40 tuotekortti.

6.4 Valmistuksessa huomioitavat seikat

Sulkujen valmistuksen tärkein vaihe lujuuskestävyyttä ajatellen on hitsaus. Jos sulkujen väliseen hitsausseamaukseen jää sulkeutumia, onteloita tai halkeamia, on hitausliitoksen kestävyys kyseenalaista. Jos hitsausvirta tai syöttö on liian pieni tai kuljetusnopeus liian suuri, ei hitsausseama tunkeudu sulkujen rakenteeseen tarpeeksi syvälle jättäen sulkupuolikkaat erilleen toisistaan. Poraussulkujen tapauksessa hyvän hitsauslaadun takeena ovat ammatillisesti pätevät hitsaajat, hitsausrobotti sekä laadunvarmistus. Kuviossa 25 on esitetty tilanne, jossa hitsauksessa on käytetty joko liian pientä hitsausvirtaa tai syöttöä, tai kuljetusnopeus on ollut liian suuri. Tuloksena on huono hitsin tunkeutuminen, jonka pituutta kuvaa kirjain x. (Lukkari, J. 2001.)



KUVIO 25. Hitsin huono tunkeutuminen

6.5 FEM-analyysin luotettavuus

FEM-laskenta toteutettiin myös kokoonpano-periaatteella sekä käyttämällä kahta eri FEM-ohjelmaa, jotta saataisiin tietoa analyysin luotettavuudesta. Kuten 5.2.8-kohdassa ilmenee, kokoonpano-mallin antamat tulokset vastasivat lujuusraporteissa käytettyä yksinkertaistettua laskentamallia hyvin. Ero näissä laskentamalleissa oli vain 4 %. CATIA:lla laskettu kokoonpanotilanne antoi 10 % pienemmät jännitykset verrattuna ANSYS:in yksinkertaistettuun laskentamalliin. Tulosten eroavaisuuteen vaikuttaa ohjelmien erilainen lasku- sekä kiinnitystapa.

Lujuuslaskenta käsin poraussuluille ei ole varteenotettava vaihtoehto johtuen niiden monimutkaisesta rakenteesta. Lujuuslaskelmassa tulisi vastaan niin suuret yhtälöryhmät, että sen ratkaiseminen olisi miltei mahdotonta. Vertailuna sanottakoon, että nykyaikaisellakin tietokoneella sulkumallin lujuuslaskenta vie muutamasta kymmenestä sekunnista useisiin kymmeniin minuutteihin, riippuen käytetystä elementtiverkon koosta. Edellä mainitusta syystä FEM-laskennalle ei ole saatu vertailupohjaa käsinlaskennasta.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämä opinnäytetyö sisälsi poraussulkujen mallinnusta, lujuuslaskentaa ja standardisointia. Poraussulut saatiin asemoitua standardin SFS-EN 10025 ja painedirektiivin 97/23/EY alle. Suluista tehtiin asianmukaiset mitoituspiirustukset ja lujuustarkastelut hyväksyttämismenettelyä varten. Lujuustarkastelut ovat raportoituna sulkukohtaisesti lujuusraporteissaan. Lujuusraporteista tehtiin myös tuotekortit, joista selviää sulkujen koskevat tekniset tiedot nopealla vilkaisulla.

Opinnäytetyö oli haastava. Haastavuutta toivat lukuisat standardit ja direktiivit, joista täytyi valita parhaiten sulkujen toimintaa koskevat pykälät. Sulkujen geometrian mallintaminen oli sujuvaa, mutta lujuuslaskenta toi työmäärää työhön yllättävän paljon. Suurin haaste lujuuslaskennassa oli se, kuinka mallintaa poraussulun todennukainen käyttötilanne FEM-laskentaan. Reunaehtojen ja rasituksen määrittelyt ovat lujuuslaskennan tuloksien kannalta ratkaisevin tekijä (Hietikko 2004, 150).

Lujuustarkastelujen perusteella sulut DN 20 – DN 80 kestävät sekä ympärihitsatun tilanteen että sulkulevy-tilanteen rasitukset korkein varmuusluvuin. Myös sulku DN 100 kestää ympärihitsatun tilanteen hyvin, mutta sulkulevy-tilanteessa varmuusluku on alle yhden. Tämä ei kuitenkaan ole kriittistä, koska ei olla vielä lähelläkään murtorajaa, eikä taipuma tiivisteen kohdalla aiheuta paineen purkautumista sulun ulkopuolelle. Edellä mainittujen sekä 6.2-kohdan perusteluiden pohjalta voidaan kaikki sulut hyväksyttää lujuusteknisestä näkökulmasta.

Poraussulkujen ja palveluiden hyväksyttämismenettely etenee Tonisco System Oy:n toimesta eteenpäin. Yritys käyttää opinnäytetyön tuloksia ja materiaalia hyväksyttämismenettelyn edetessä. Täten voidaan todeta, että opinnäytetyö saavutti kaikki sille asetetut tavoitteet hyvin.

LÄHTEET

Airila, M., Ekman, K., Hautala, P., Kivioja, S., Kleimola, M., Martikka, H., Miettinen, J., Niemi, E., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P., Verho, A., Vilenius, M., Välimaa, V. & WSOYpro Oy. 2009. Koneenosien suunnittelu. Helsinki: WSOY

ANSYS-ohjelman kotisivu. 2012. Luettu 3.4.2012
<http://www.ansys.com/>

CATIA-ohjelman kotisivu. 2012. Luettu 3.4.2012
<http://www.3ds.com/products/catia>

Hietikko, E. 2004. Palkki, Lujuuslaskennan perusteet. Kuopio: Otava

Järvi, R. Levyseppähitsaaja. 2011. Haastattelu hitsausprosessin kulusta. Tampere.

Lukkari, J. 2001. Hitsien laatu ja hitsausvirheet. Helsinki: OY ESAB

Lähteenmäki, M. Lujuushypoteesit. 2010. Luettu 4.4.2012
http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/luj2_pdf/hypot_k.pdf

Outinen, H., Salmi, T. & Vulli, P. 2007. Lujuusopin perusteet. Tampere: Pressus Oy

Nisso, K. Laatupäällikkö 2012. DN 80 ja 100, uudelleen suunnittelua? Sähköpostiviesti. kaarlo.nisso@gmail.com. Luettu 23.2.2012.

Nisso, K. Laatupäällikkö. 2011a. Haastattelu Tonisco Systems Oy:ssä. Tampere.

Nisso, K. Laatupäällikkö 2011b. Poraussulkujen Hyväksyttämistarkastelu – Mallinnus ja lujuuslaskenta. Sähköpostiviesti. kaarlo.nisso@gmail.com. Luettu 9.12.2011.

Painelaitedirektiivi 97/23/EY. 1997. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto.

SFS-EN 10025-2. 2004. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 22768-1. 1993. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

TONISCO Jr. -Haaroitukset käyttäen hitsattavia poraventtiilejä. Poraussulkujen asennusohje. Tampere: Tonisco System Oy.

LIITTEET

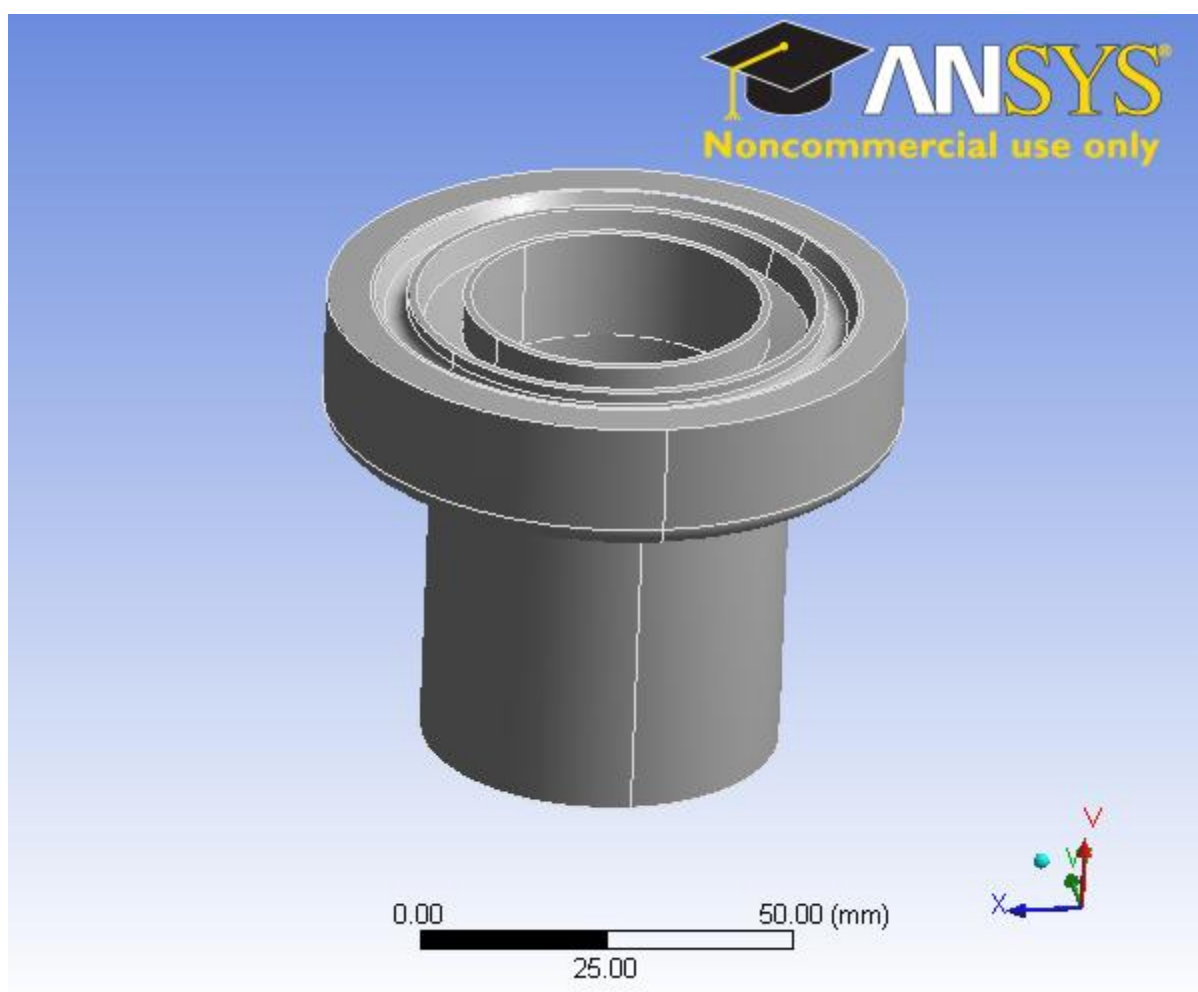
Liite 1. Sulkujen tulostaulukko

Sulku	Re sallittu / MPa	Re sallittu hitsi / MPa	Rm sallittu / MPa	Maksimijännitys / Mpa		Varmuusluku		Siirtymä / mm	
				Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
DN 20 suora	325	276	470	17,0		16,3		0,0009	
DN 20 kierrepuoli	325	276	470	18,3	28,5	15,1	9,7	0,0009	0,015
DN 25 suora	325	276	470	17,6		15,7		0,0008	
DN 25 kierrepuoli	325	276	470	18,7	41,6	14,8	6,6	0,0008	0,002
DN 32 suora	325	276	470	18,3		17,8		0,0008	
DN 32 kierrepuoli	325	276	470	21,7	91,4	12,7	3,0	0,001	0,004
DN 40 suora	325	276	470	20,3		16,0		0,001	
DN 40 kierrepuoli	325	276	470	19,5	123,3	16,7	2,2	0,001	0,006
DN 50 suora	315	268	470	25,1		10,7		0,001	
DN 50 kierrepuoli	315	268	470	19,4	99,4	13,8	2,7	0,001	0,008
DN 65 suora	295	251	450	27,5		10,7		0,002	
DN 65 kierrepuoli	295	251	450	27,2	155,6	9,2	1,6	0,002	0,01
DN 80 suora	295	251	450	28,3		8,9		0,002	
DN 80 kierrepuoli	295	251	450	27,0	182,6	9,3	1,4	0,002	0,02
DN 100 suora	295	251	450	40,8		6,1		0,003	
DN 100 kierrepuoli	295	251	450	36,5	392,9	6,9	0,6	0,003	0,06
DN 100 kierrepuoli plastinen malli	295	251	450		305,6		0,8		0,06



DN 40 suora case 1

First Saved	Friday, February 10, 2012
Last Saved	Tuesday, March 13, 2012
Product Version	12.0.1 Release



(jatkuu)

Contents

2 (19)

- [Units](#)
- [Model \(A4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Part1.1](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Mesh](#)
 - [Static Structural \(A5\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Solution \(A6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Results](#)
- [Material Data](#)
 - [Structural Steel](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (A4)

Geometry

TABLE 2

Model (A4) > Geometry (taulukko jatkuu seuraavalla sivulla)

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
Definition	
Source	X:\projects\Porasulkujen_lujuuslaskenta_NF\Opinnäytetyö\Mallinnus\Sulku DN 40\DN 40_hitsikok.stp
Type	Step
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Part Color
Bounding Box	
Length X	65, mm
Length Y	78, mm
Length Z	78, mm
Properties	
Volume	82002 mm ³
Mass	0,64372 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1

Nodes	21164
Elements	11515
Mesh Metric	None
Preferences	
Import Solid Bodies	Yes
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	No
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\k7nfinsk.TAMK\AppData\Roaming\Ansys\v120
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (A4) > Geometry > Parts (taulukko jatkuu seuraavalla sivulla)

Object Name	<i>Part1.1</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes

Bounding Box	
Length X	65, mm
Length Y	78, mm
Length Z	78, mm
Properties	
Volume	82002 mm ³
Mass	0,64372 kg
Centroid X	64,714 mm
Centroid Y	3,9739e-003 mm
Centroid Z	-3,9627e-003 mm
Moment of Inertia Ip1	533,42 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	430,71 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	430,6 kg·mm ²
Statistics	
Nodes	21164
Elements	11515
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Ansys System Number	0,
Origin	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
Origin Z	0, mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

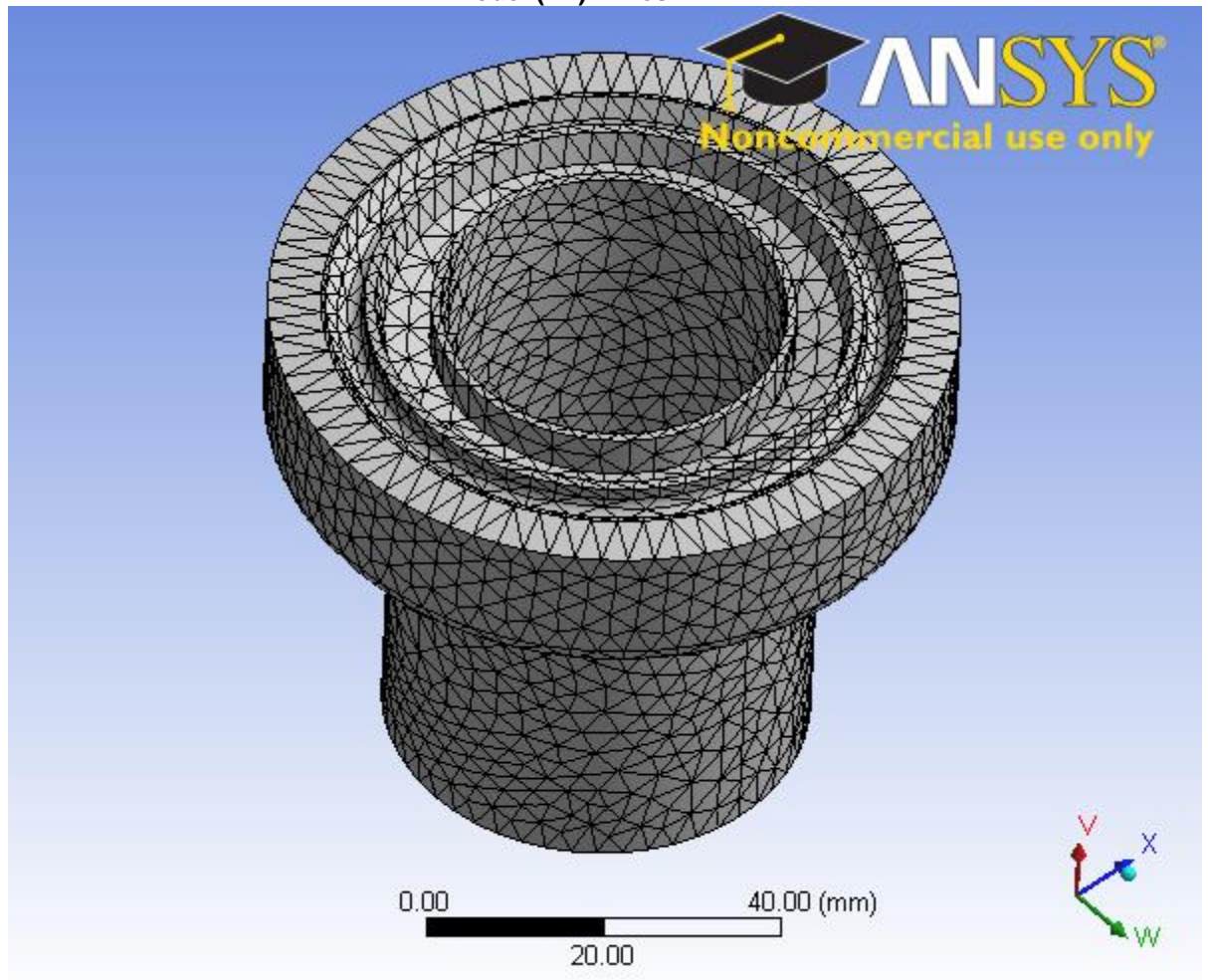
Mesh

TABLE 5
Model (A4) > Mesh (taulukko jatkuu seuraavalla sivulla)

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Medium
Element Size	3,0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse

Minimum Edge Length	1,e-002 mm
Inflation	
Use Automatic Tet Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Kept
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Pinch	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate on Refresh	No
Statistics	
Nodes	21164
Elements	11515
Mesh Metric	None

FIGURE 1
Model (A4) > Mesh



Static Structural (A5)

TABLE 6
Model (A4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (A5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	ANSYS Mechanical
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Nonlinear Controls	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Output Controls	
Calculate Stress	Yes
Calculate Strain	Yes
Calculate Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	X:\projects\Porasulkujen_lujuuslaskenta_NF\Opinnäytetyö\Lujuuslaskut\DN 40\DN 40 suora case 1_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save ANSYS db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mmm

TABLE 8
Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads

Object Name	Hitsi väli	Hitsi pääty	Paine 1	Paine 2
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	1 Face	3 Faces	6 Faces	14 Faces
Definition				
Type	Displacement	Fixed Support	Pressure	
Define By	Components		Normal To	
Coordinate System	Global Coordinate System			
X Component	0, mm (ramped)			
Y Component	Free			
Z Component	Free			
Suppressed	No			
Magnitude				2,5 MPa (ramped)

FIGURE 2
Model (A4) > Static Structural (A5) > Hitsi väli

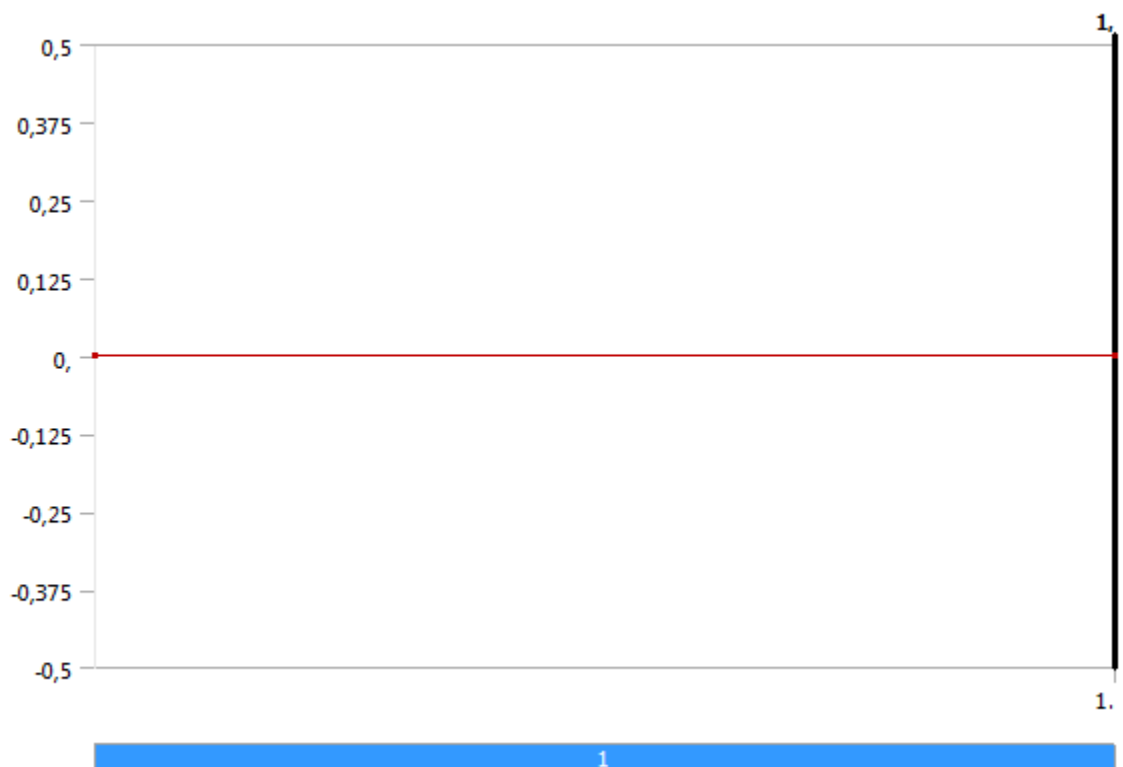


FIGURE 3
Model (A4) > Static Structural (A5) > Hitsi väli

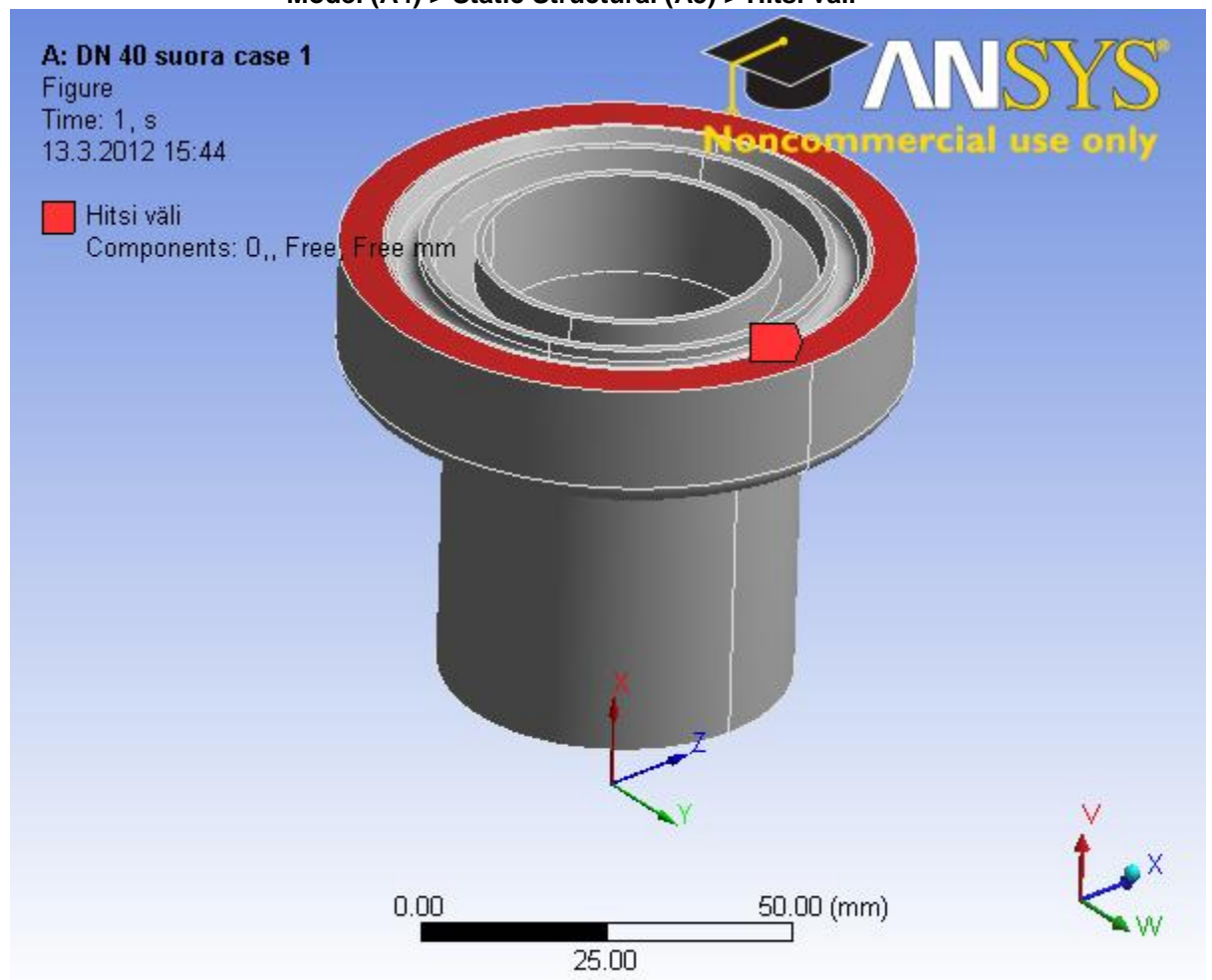


FIGURE 4
Model (A4) > Static Structural (A5) > Hitsi pääty

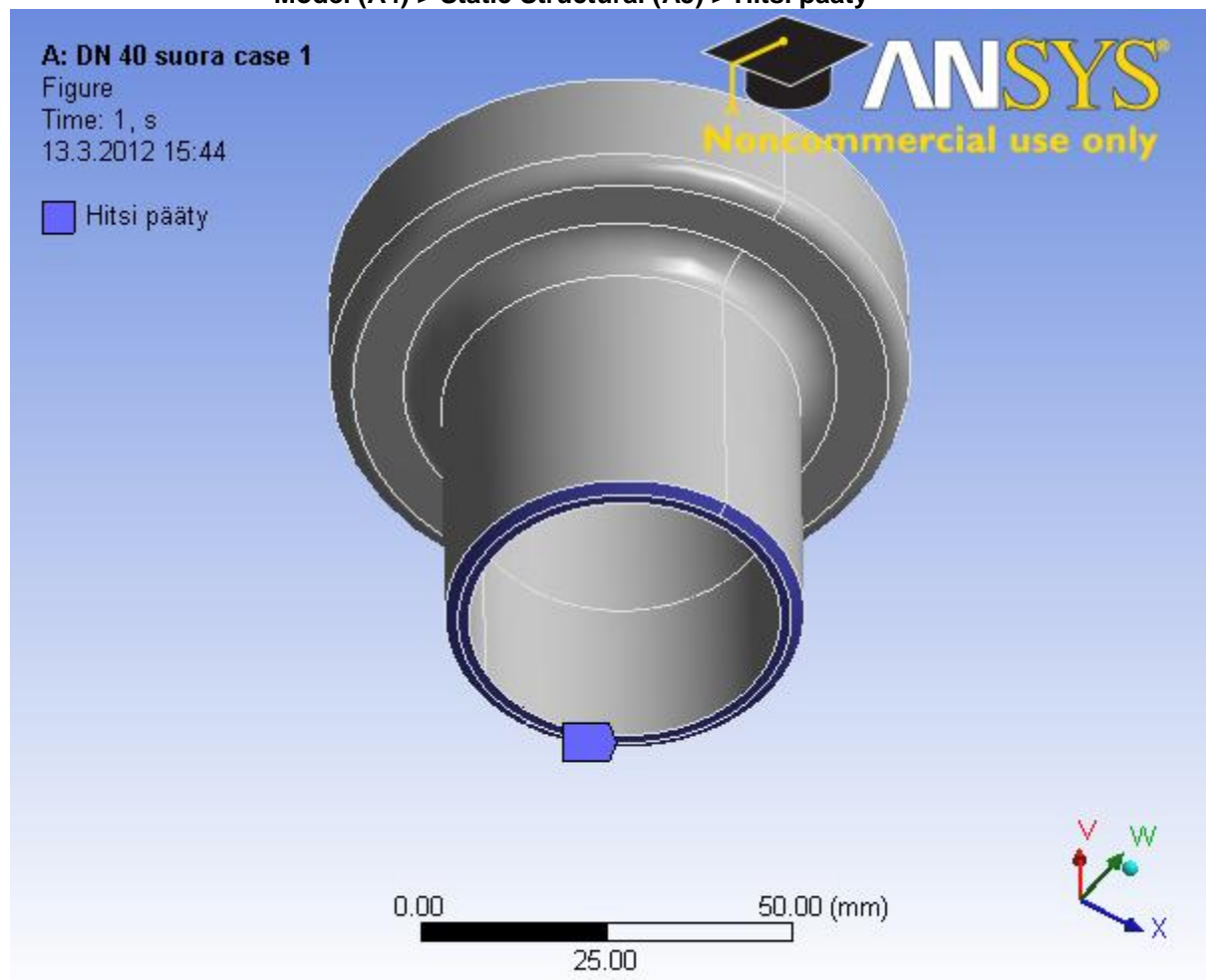


FIGURE 5
Model (A4) > Static Structural (A5) > Paine 1

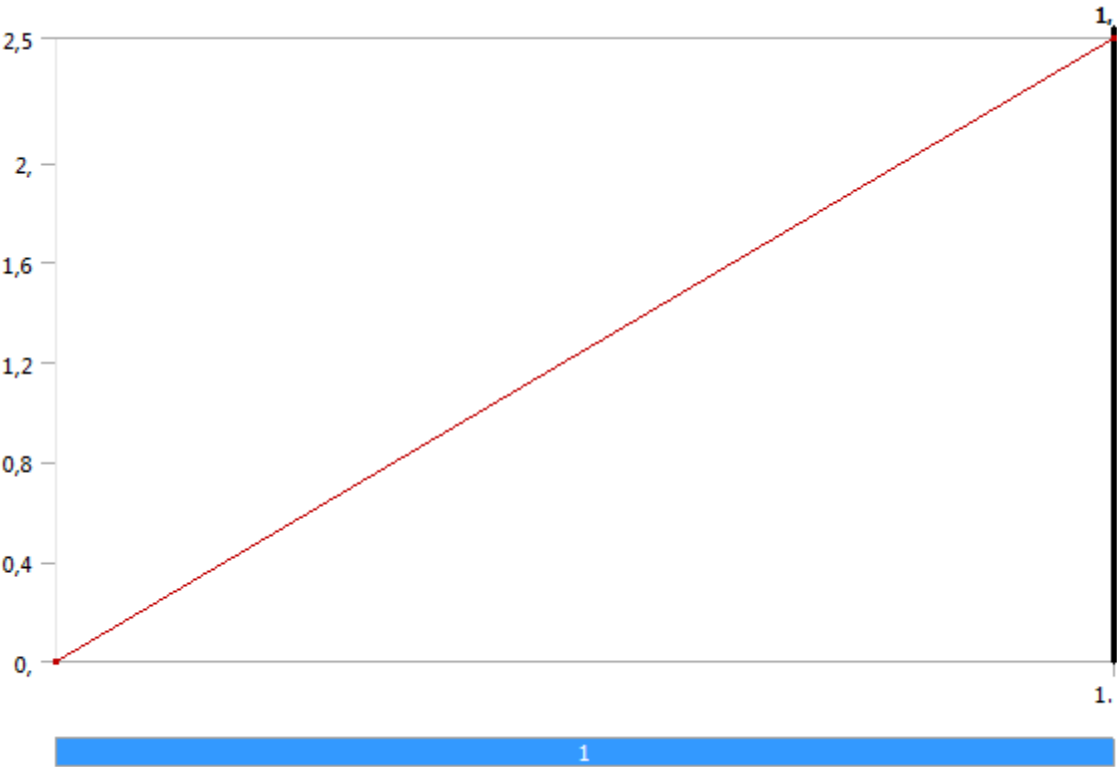


FIGURE 6
Model (A4) > Static Structural (A5) > Paine 1

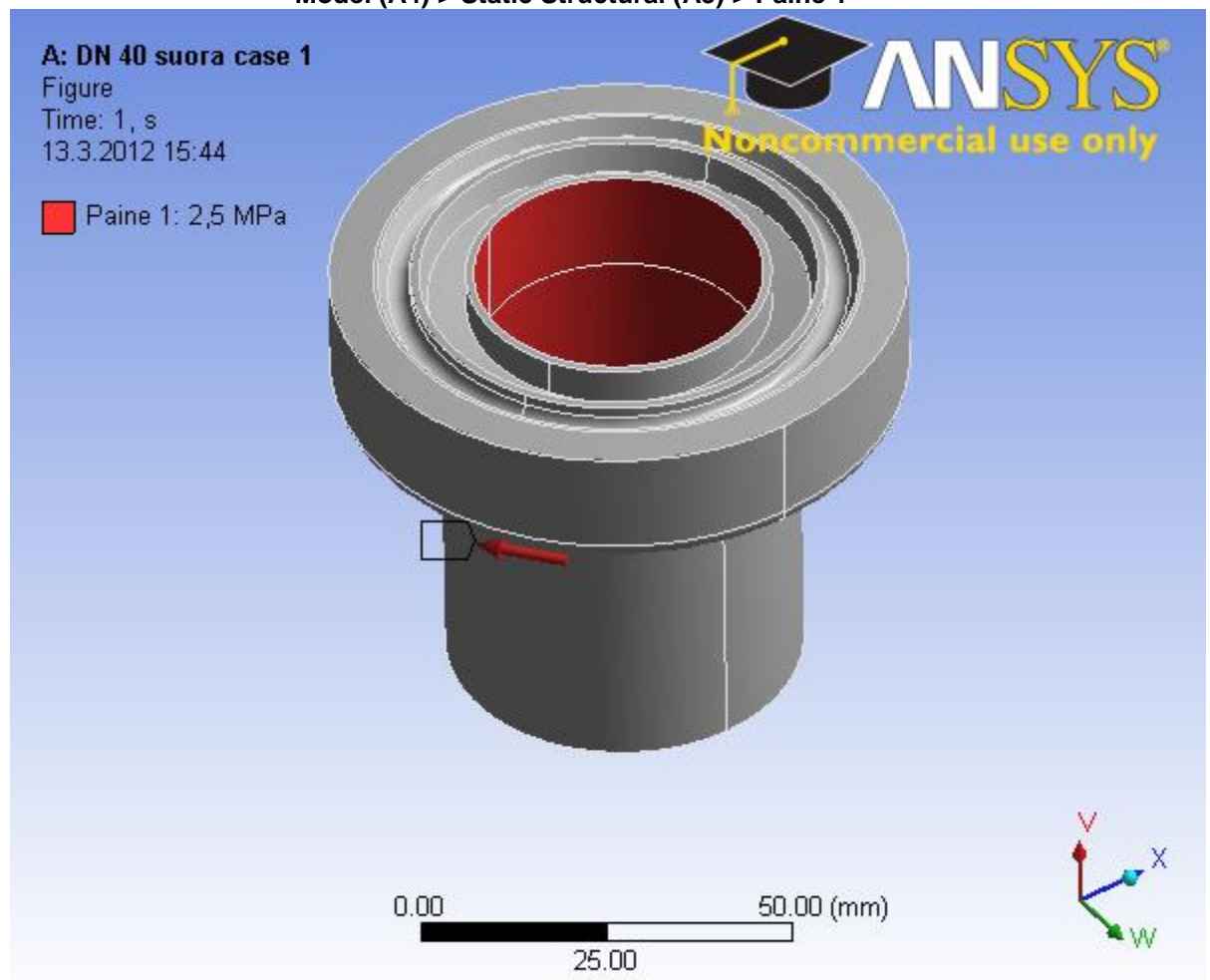


FIGURE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Paine 2

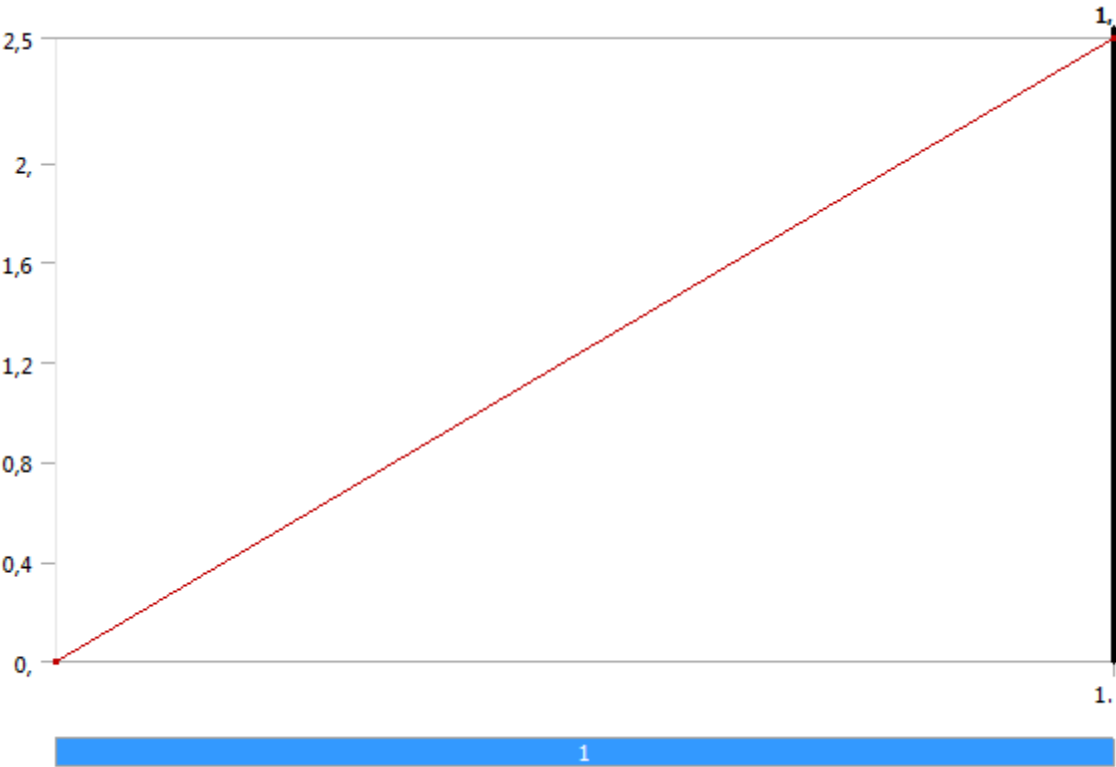
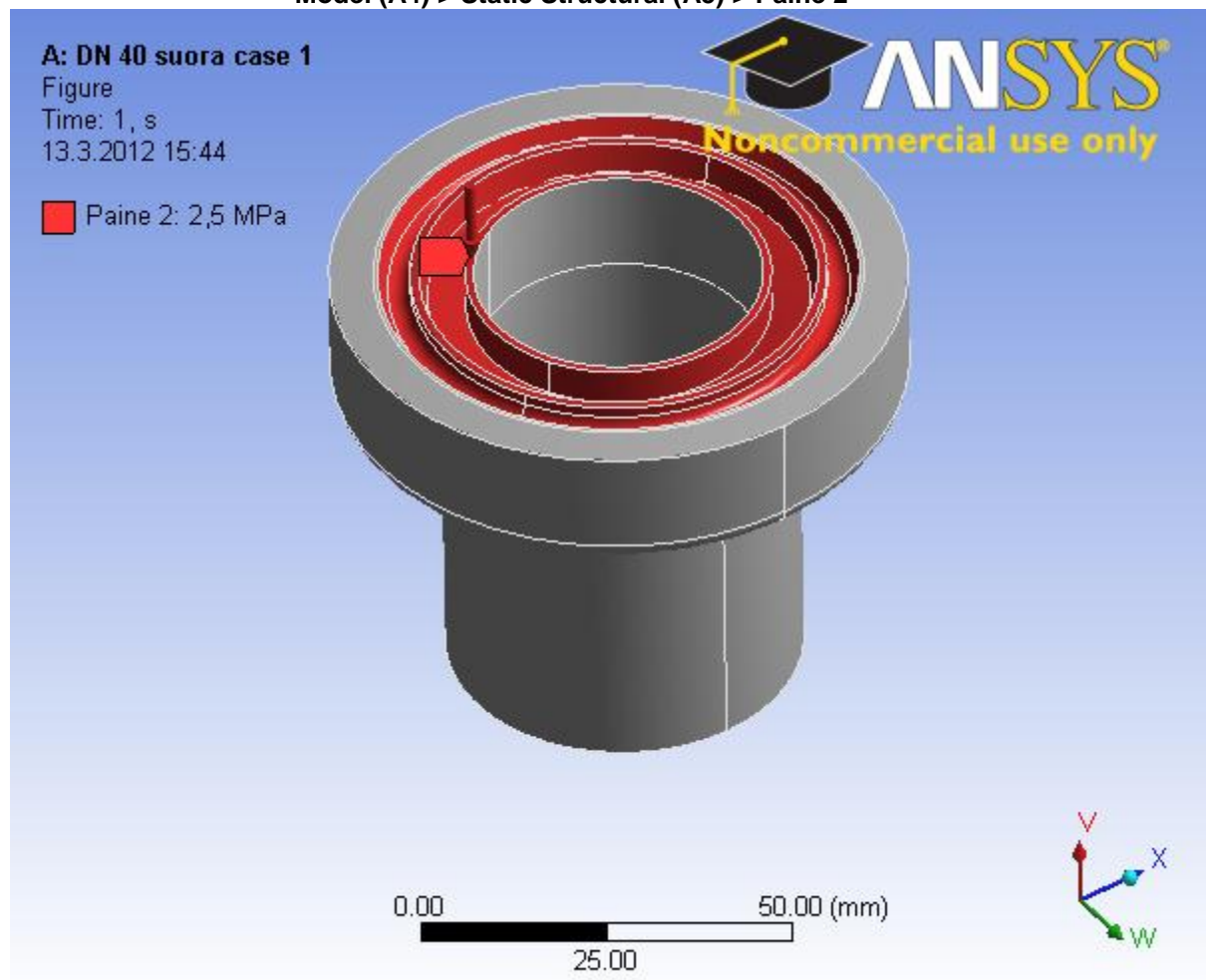


FIGURE 8
Model (A4) > Static Structural (A5) > Paine 2



Solution (A6)

TABLE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,

TABLE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All

TABLE 11
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	0,52457 s
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Use Average		Yes
Results		
Minimum	0, mm	0,14807 MPa
Maximum	2,0151e-003 mm	20,25 MPa
Information		
Time	1, s	
Load Step	1	
Substep	1	
Iteration Number	1	

FIGURE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

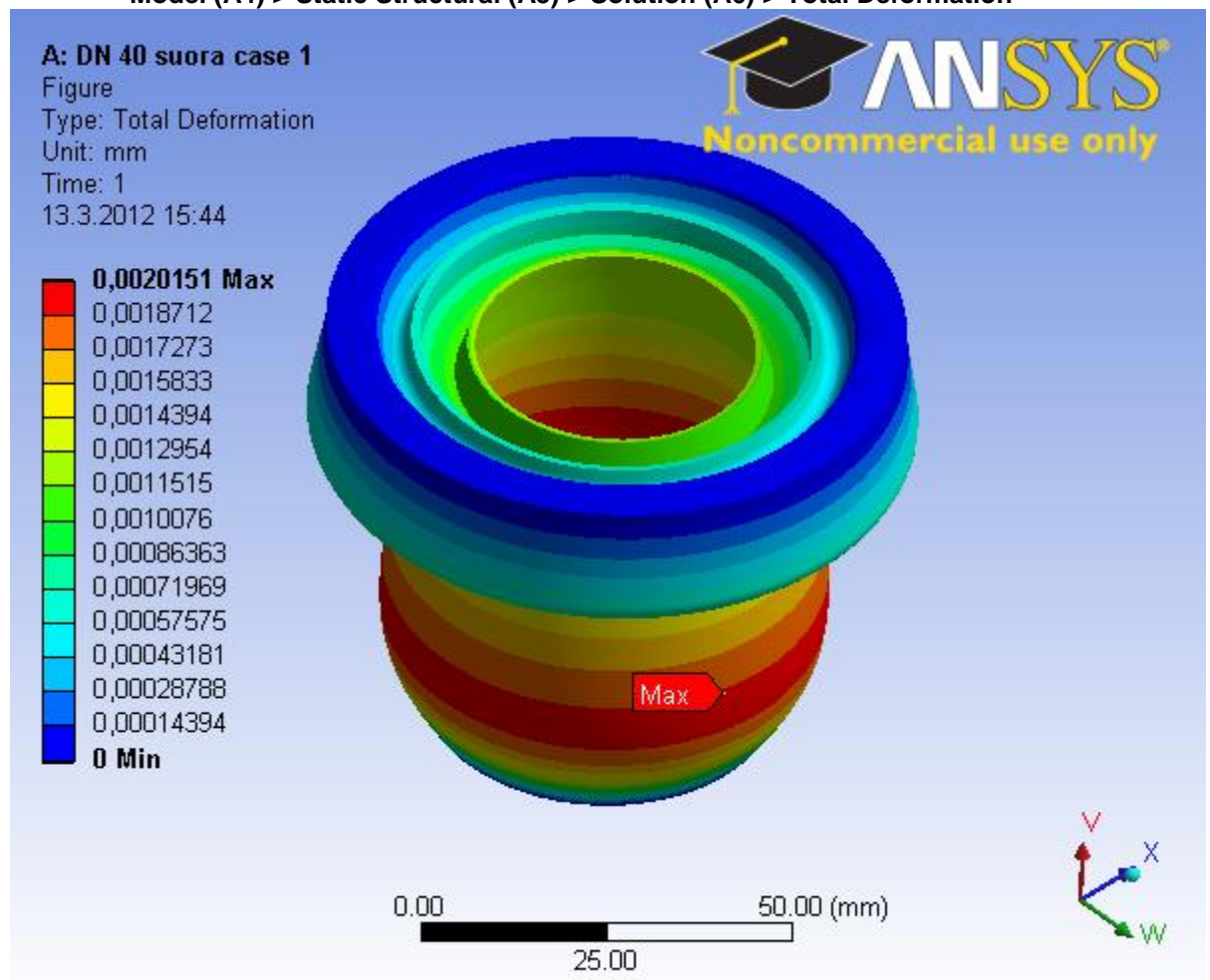
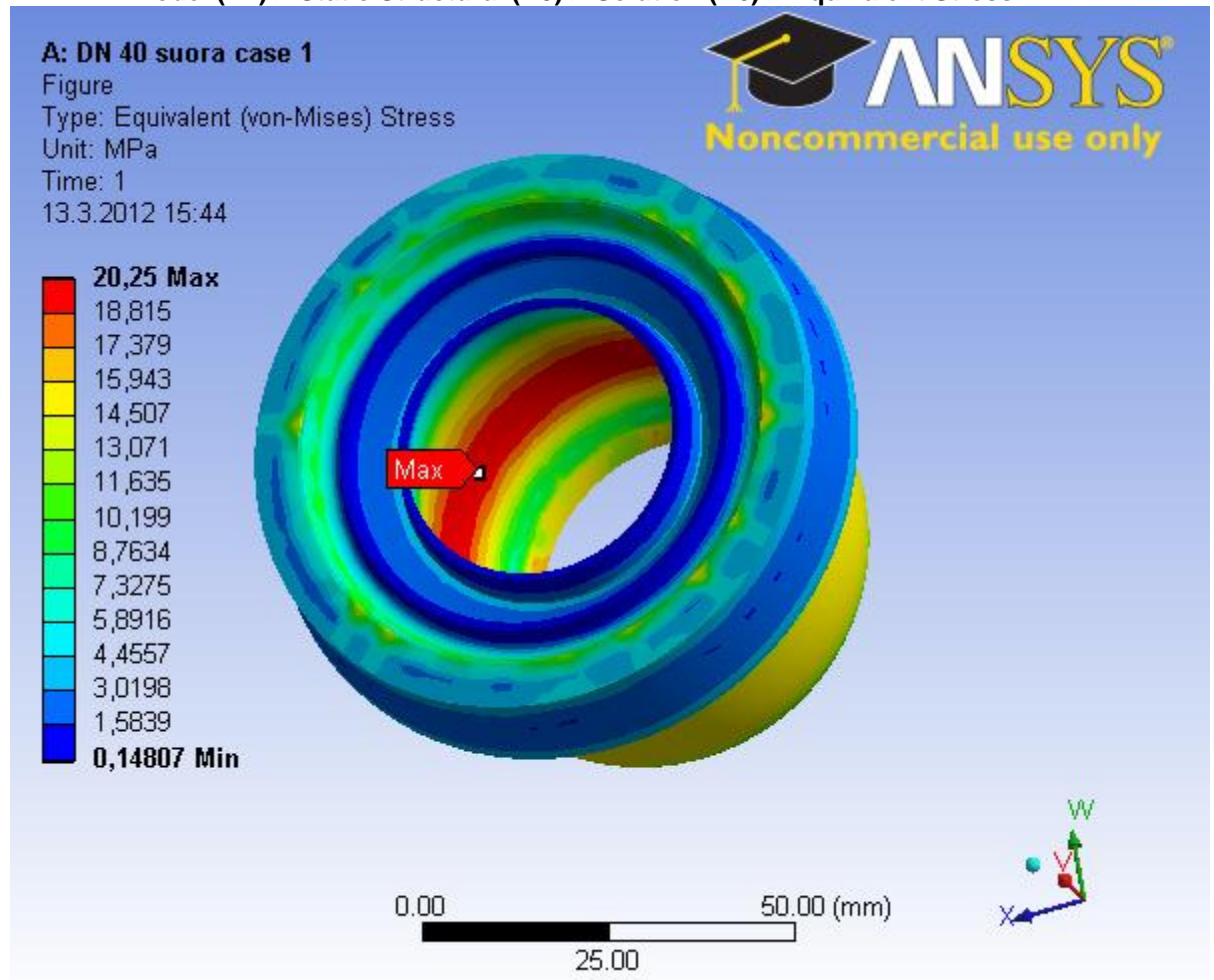


FIGURE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress



Material Data

Structural Steel

TABLE 12
Structural Steel > Constants

Density	7.85e-006 kg mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	4.34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	6.05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1.7e-004 ohm mm

TABLE 13
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
0

TABLE 14
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
355

TABLE 15
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
355

TABLE 16
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
510

TABLE 17
Structural Steel > Alternating Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999	10	0
2827	20	0
1896	50	0
1413	100	0
1069	200	0
441	2000	0
262	10000	0
214	20000	0
138	1.e+005	0
114	2.e+005	0
86.2	1.e+006	0

TABLE 18
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920	-0.106	0.213	-0.47	1000	0.2

TABLE 19
Structural Steel > Relative Permeability

Relative Permeability
10000

TABLE 20
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio
	2.e+005	0.3

Yhteenveto

19 (19)

Perusaine S355J2G3: myötölujuus R_{eH} 355 MPa

Sallittu maksimijännitys SFS-EN 10025 standardin mukaisesti 325 MPa

Sallittu maksimijännitys hitsausliitoksissa painedirektiivin mukaisesti $0,85 \times 325 \text{ MPa} = 276 \text{ MPa}$

Sulun maksimijännitys kohdistuu sulun runko-osaan, joka on 20,3 MPa (figure 10).

Varmuusluku on $325 \text{ MPa} / 20,3 \text{ MPa} = 16,0 \rightarrow$ Liitos kestää

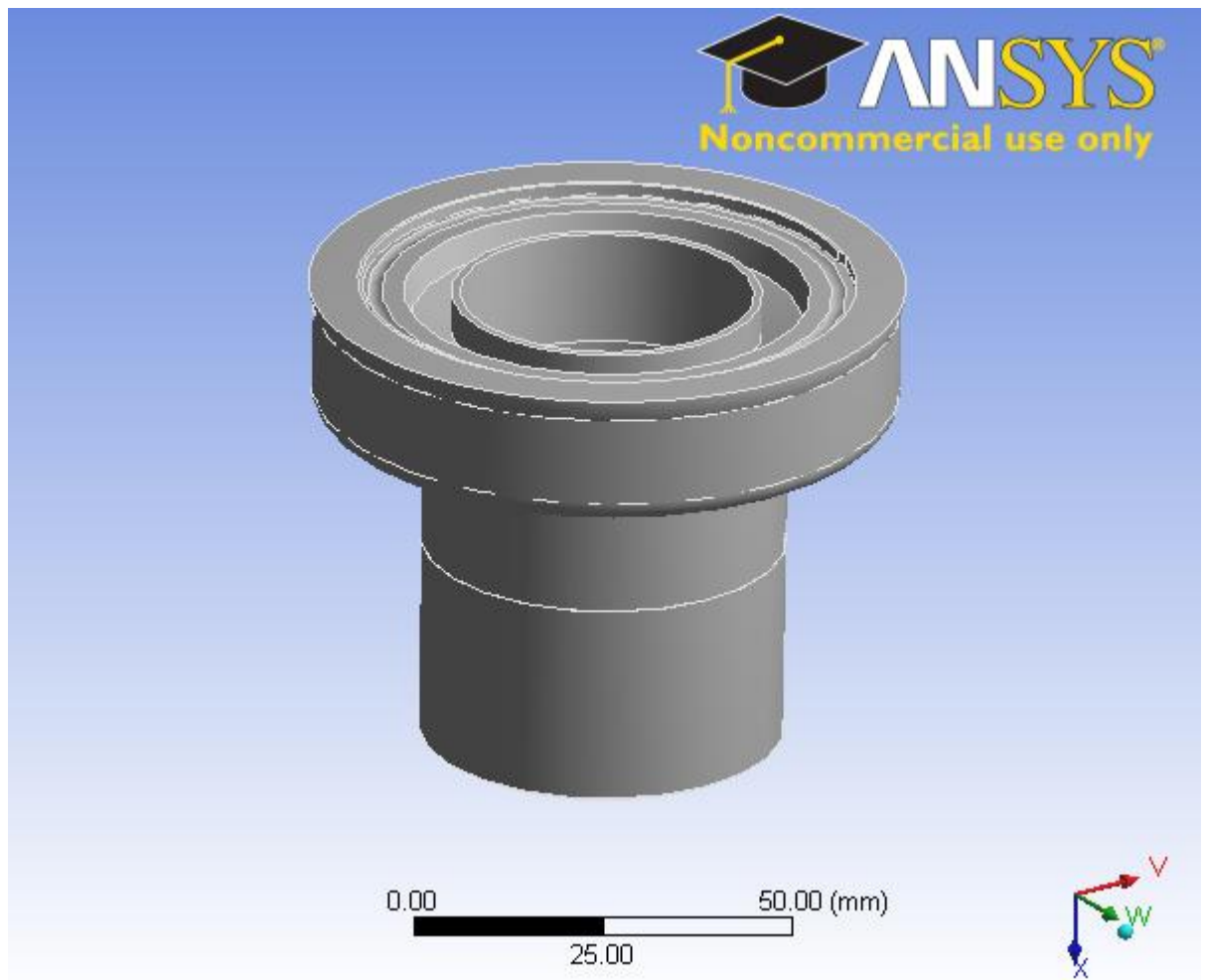
Lujuuslaskennan tuloksena suoran puolen DN 40 sululle saadaan ympärihitsatussa tilanteessa 25 barin paineella varmuusluvuksi 16,0.

Lujuuslaskennan tuloksena suoran puolen DN 40 sululle saadaan ympärihitsatussa tilanteessa 25 barin paineella tiiviste-kohdan maksimisiirtymäksi 0,001 mm (figure 9).



DN 40 kierrepuoli case 1

First Saved	Friday, February 10, 2012
Last Saved	Tuesday, March 13, 2012
Product Version	12.0.1 Release



(jatkuu)

Contents

2 (19)

- [Units](#)
- [Model \(A4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Part1](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Mesh](#)
 - [Static Structural \(A5\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Solution \(A6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Results](#)
- [Material Data](#)
 - [Structural Steel](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (A4)

Geometry

TABLE 2

Model (A4) > Geometry (taulukko jatkuu seuraavalla sivulla)

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
Definition	
Source	X:\projects\Porasulkujen_lujuuslaskenta_NF\Opinnäytetyö\Mallinnus\Sulku DN 40\DN 40 kierteellinen_hitsikok.stp
Type	Step
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Part Color
Bounding Box	
Length X	79,009 mm
Length Y	79,009 mm
Length Z	65, mm
Properties	
Volume	81080 mm ³
Mass	0,63648 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1

Nodes	22596
Elements	12616
Mesh Metric	None
Preferences	
Import Solid Bodies	Yes
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	No
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\k7nfinsk.TAMK\AppData\Roaming\Ansys\v120
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (A4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Part1</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	79,009 mm
Length Y	79,009 mm
Length Z	65, mm
Properties	
Volume	81080 mm ³
Mass	0,63648 kg
Centroid X	-2,7019e-004 mm
Centroid Y	-2,4318e-002 mm
Centroid Z	18,682 mm
Moment of Inertia Ip1	428,25 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	428,49 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	528,89 kg·mm ²
Statistics	
Nodes	22596
Elements	12616
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

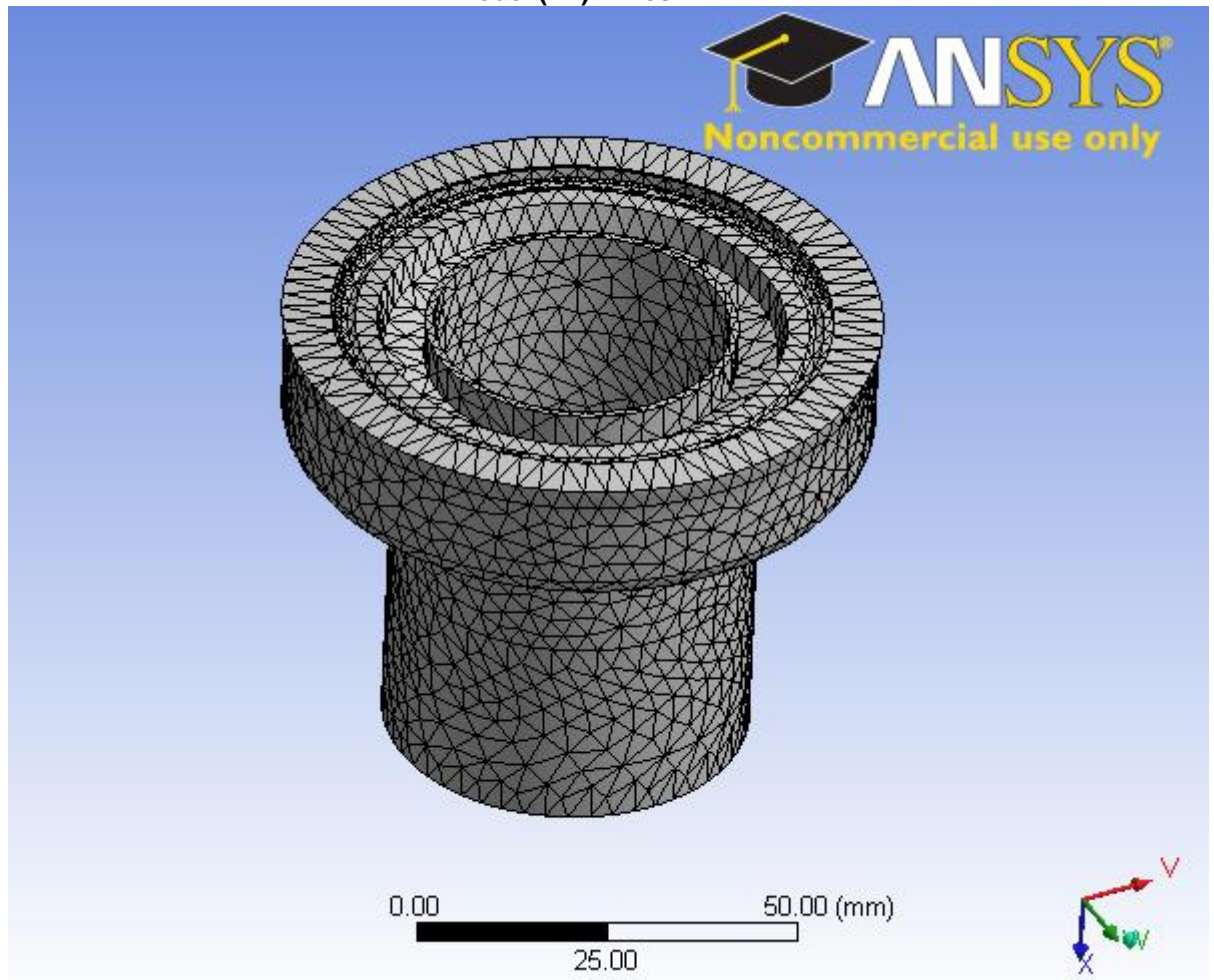
TABLE 4
Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Ansys System Number	0,
Origin	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
Origin Z	0, mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

TABLE 5
Model (A4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Medium
Element Size	3,0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1,e-002 mm
Inflation	
Use Automatic Tet Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Kept
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Pinch	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate on Refresh	No
Statistics	
Nodes	22596
Elements	12616
Mesh Metric	None

FIGURE 1
Model (A4) > Mesh



Static Structural (A5)

TABLE 6
Model (A4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (A5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	ANSYS Mechanical
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Nonlinear Controls	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Output Controls	
Calculate Stress	Yes
Calculate Strain	Yes
Calculate Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	X:\projects\Porasulkujen_lujuuslaskenta_NF\Opinnäytetyö\Lujuuslaskut\DN 40\DN 40 kierteellinen case 1_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save ANSYS db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mm

TABLE 8
Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads

Object Name	Hitsi väli	Hitsi pääty	Paine 1	Paine 2
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	1 Face	2 Faces	3 Faces	11 Faces
Definition				
Type	Displacement	Fixed Support	Pressure	
Define By	Components		Normal To	
Coordinate System	Global Coordinate System			
X Component	Free			
Y Component	Free			
Z Component	0, mm (ramped)			
Suppressed	No			
Magnitude			2,5 MPa (ramped)	

FIGURE 2
Model (A4) > Static Structural (A5) > Hitsi väli

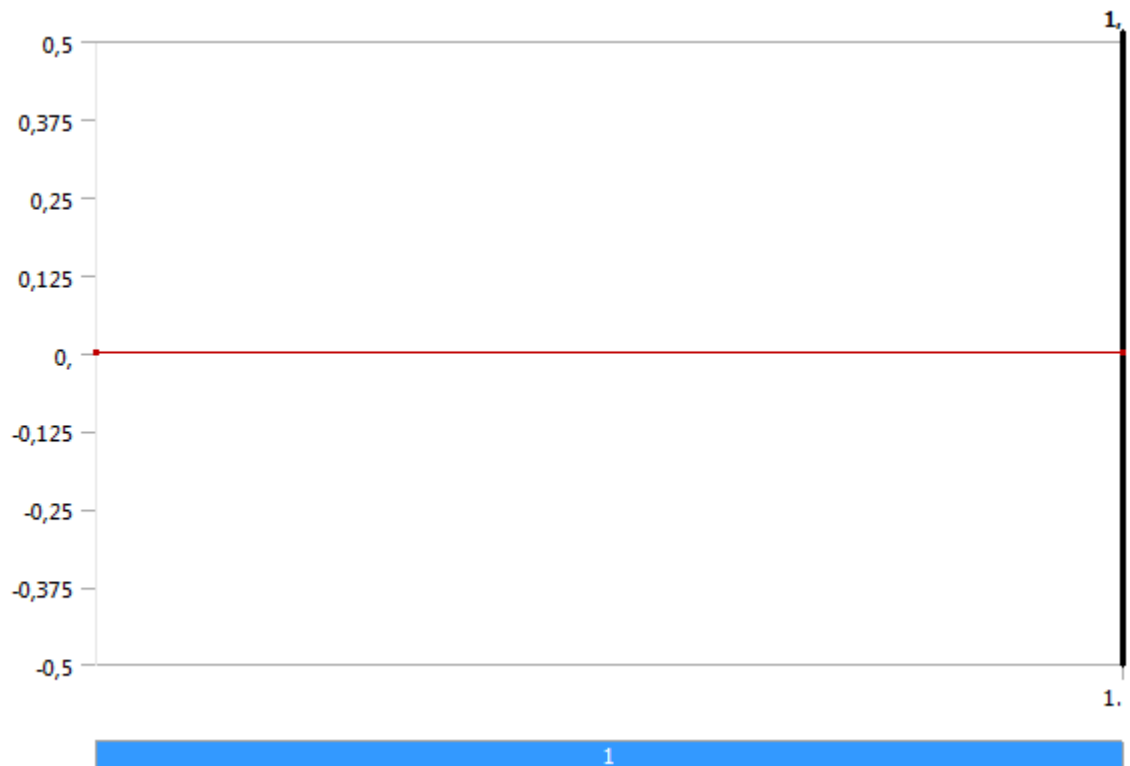


FIGURE 3
Model (A4) > Static Structural (A5) > Hitsi väli

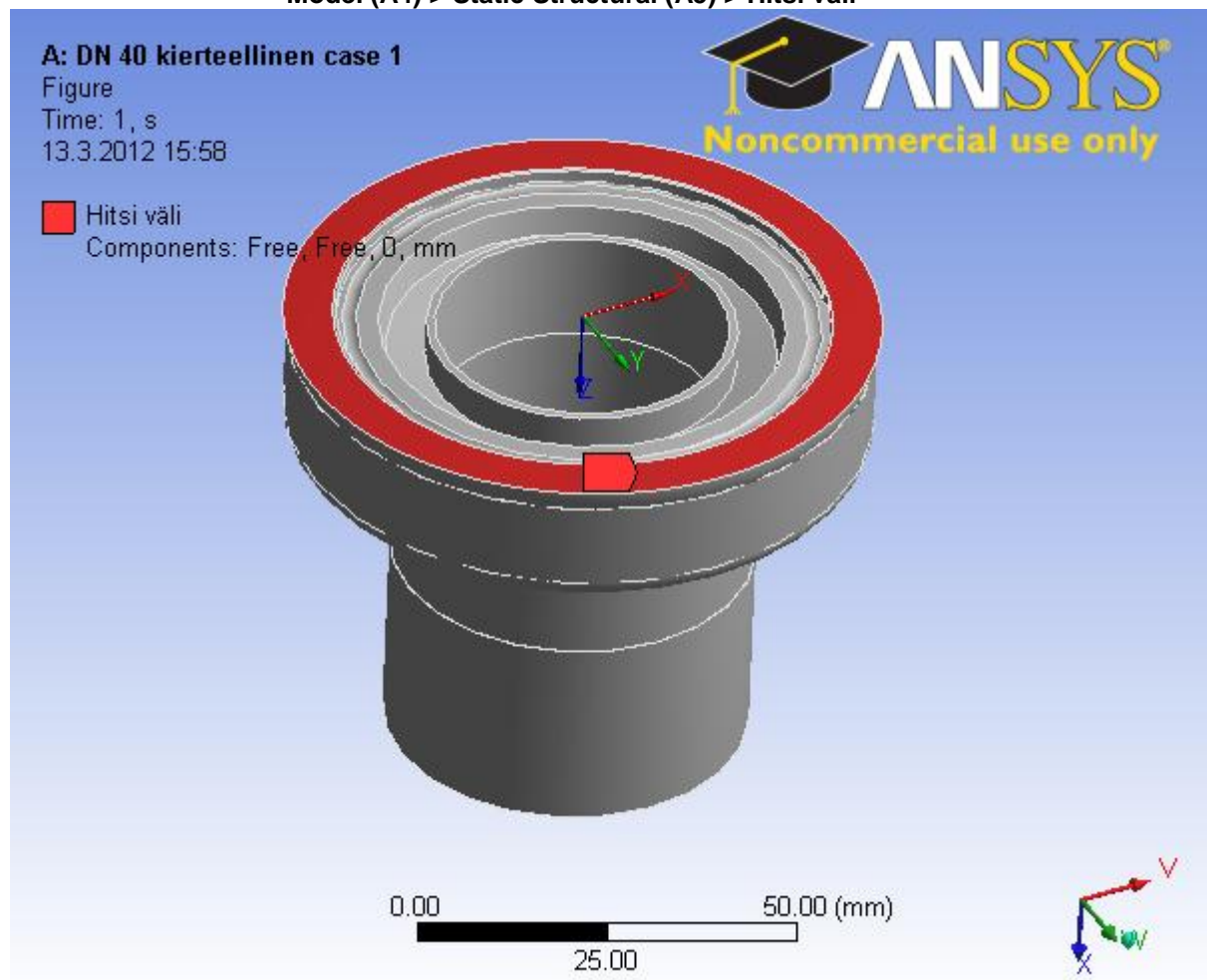


FIGURE 4
Model (A4) > Static Structural (A5) > Hitsi pääty

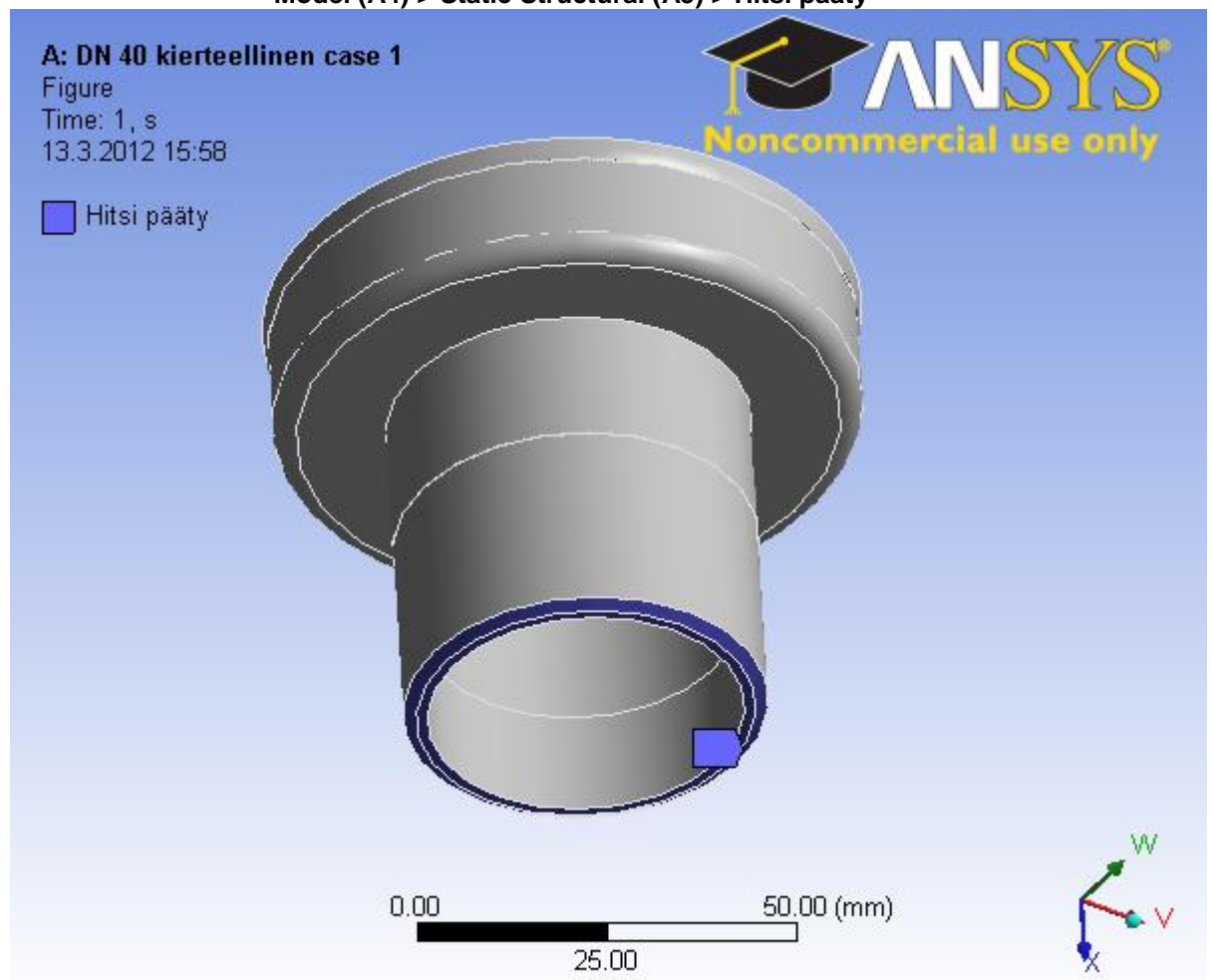


FIGURE 5
Model (A4) > Static Structural (A5) > Paine 1

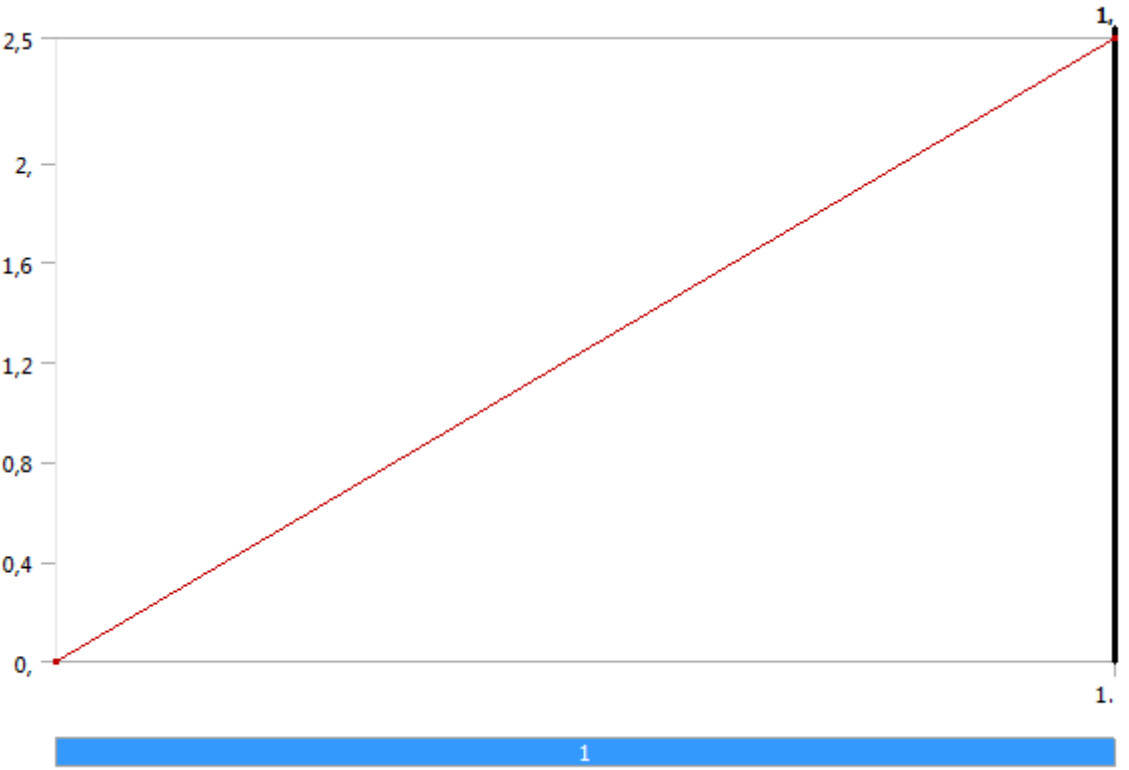


FIGURE 6
Model (A4) > Static Structural (A5) > Paine 1

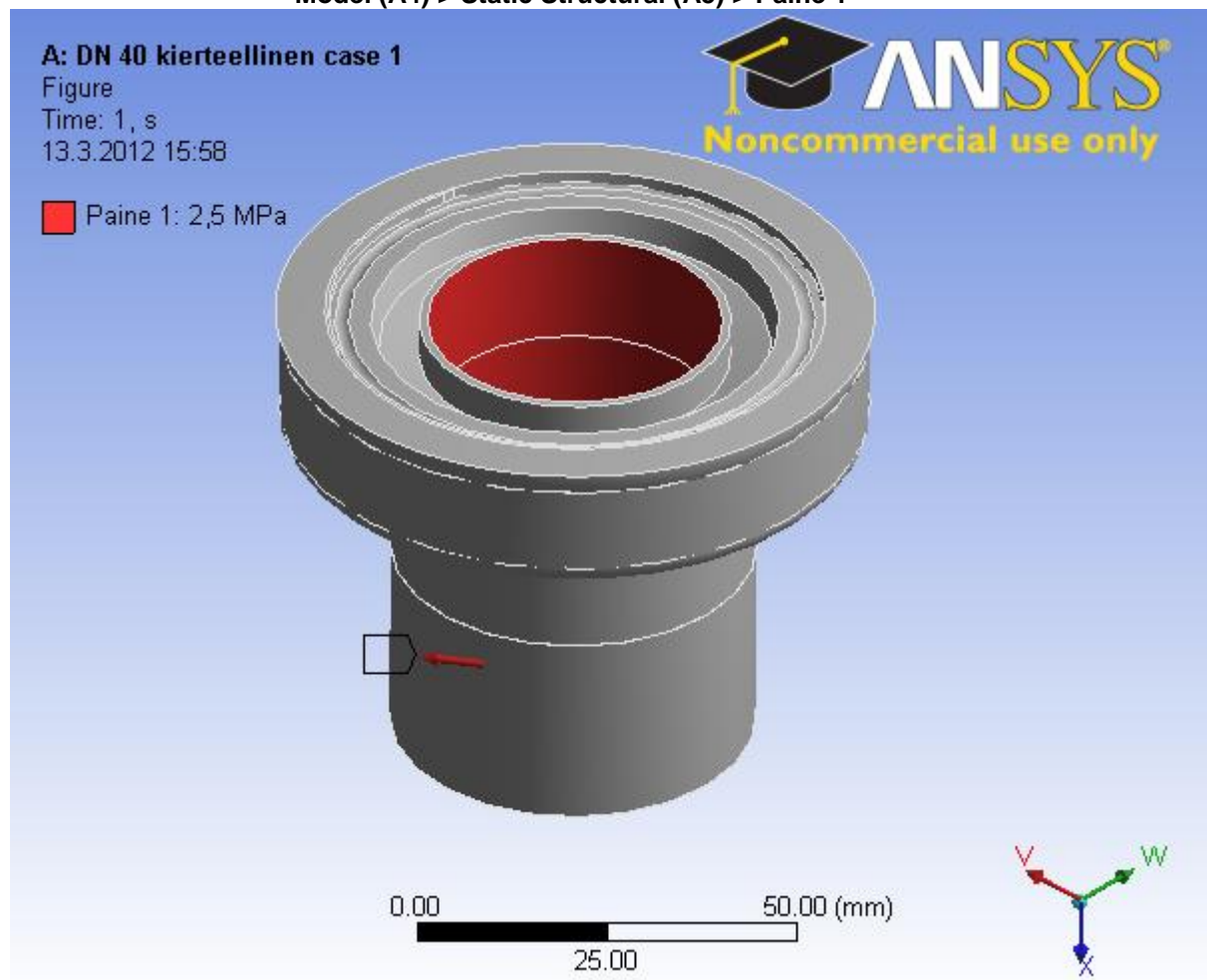


FIGURE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Paine 2

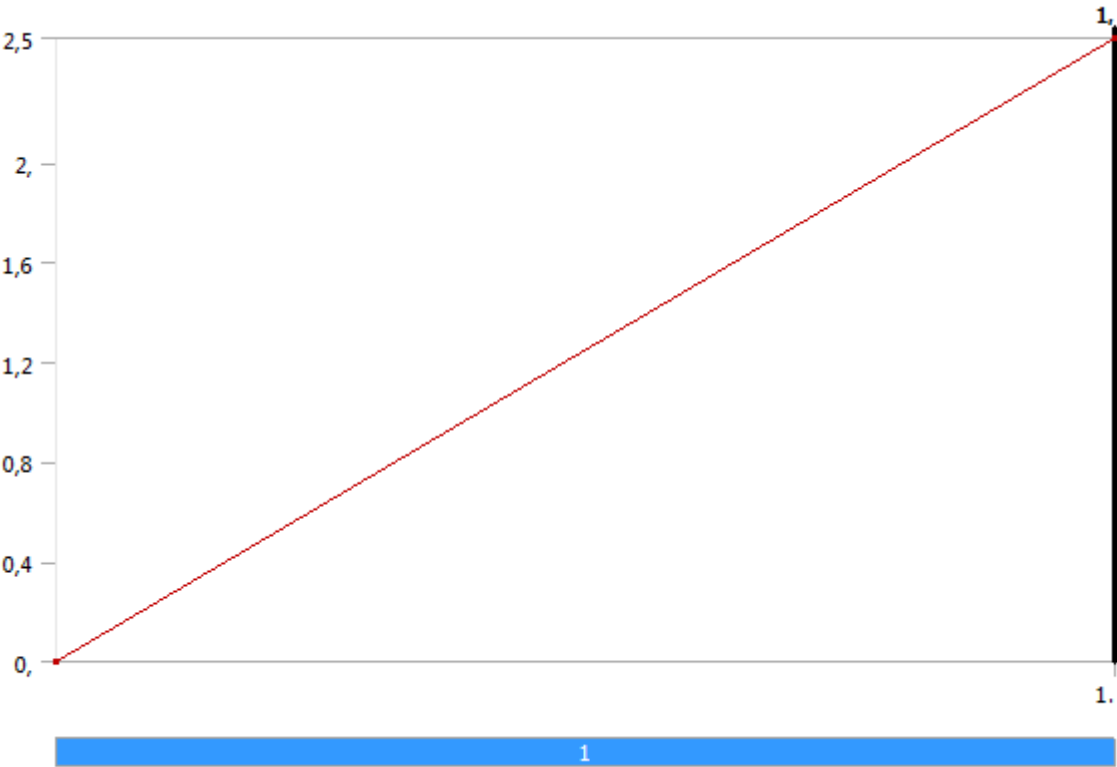
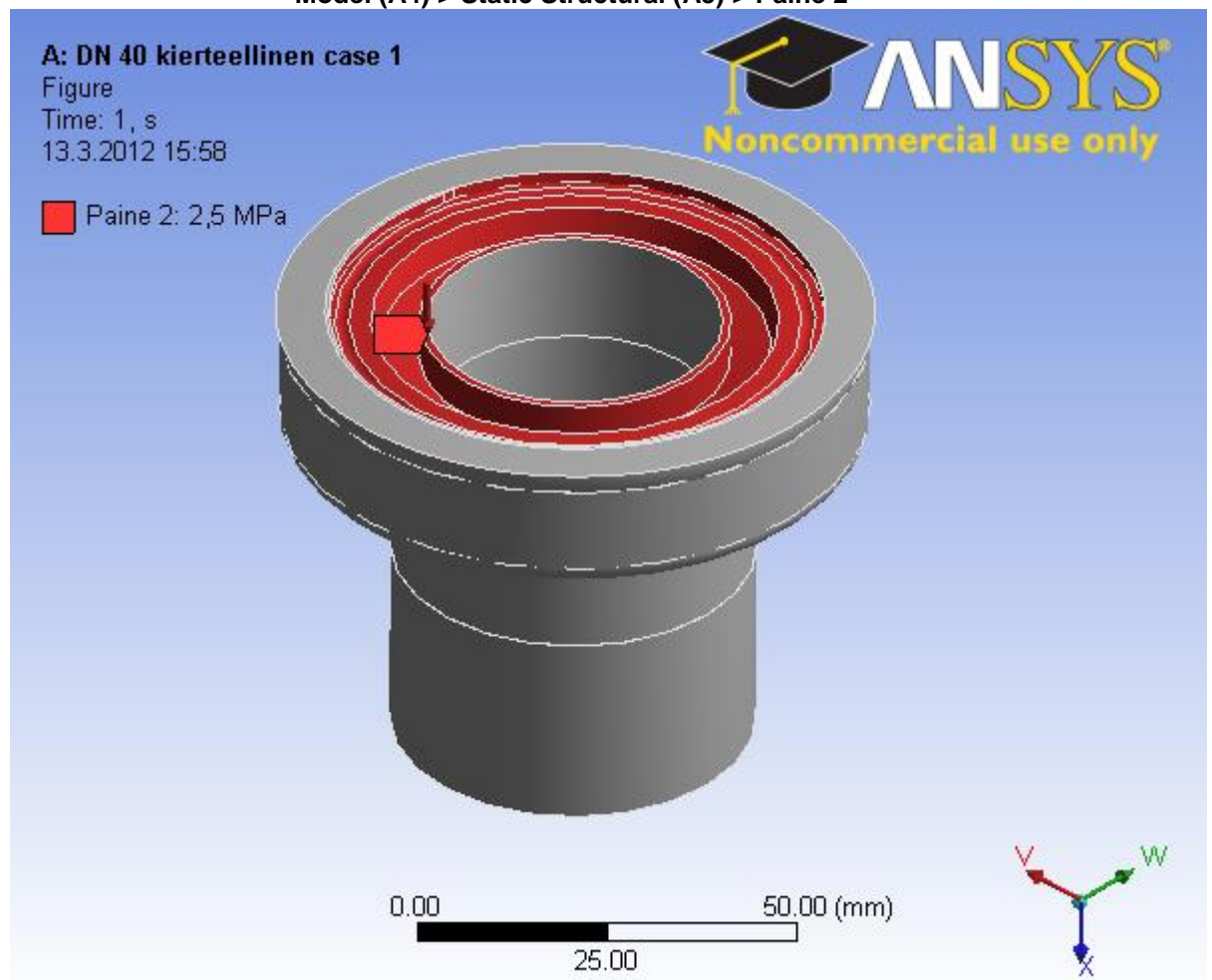


FIGURE 8
Model (A4) > Static Structural (A5) > Paine 2



Solution (A6)

TABLE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,

TABLE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All

TABLE 11
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Use Average		Yes
Results		
Minimum	0, mm	0,30325 MPa
Maximum	1,8936e-003 mm	19,512 MPa
Information		
Time	1, s	
Load Step	1	
Substep	1	
Iteration Number	1	

FIGURE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

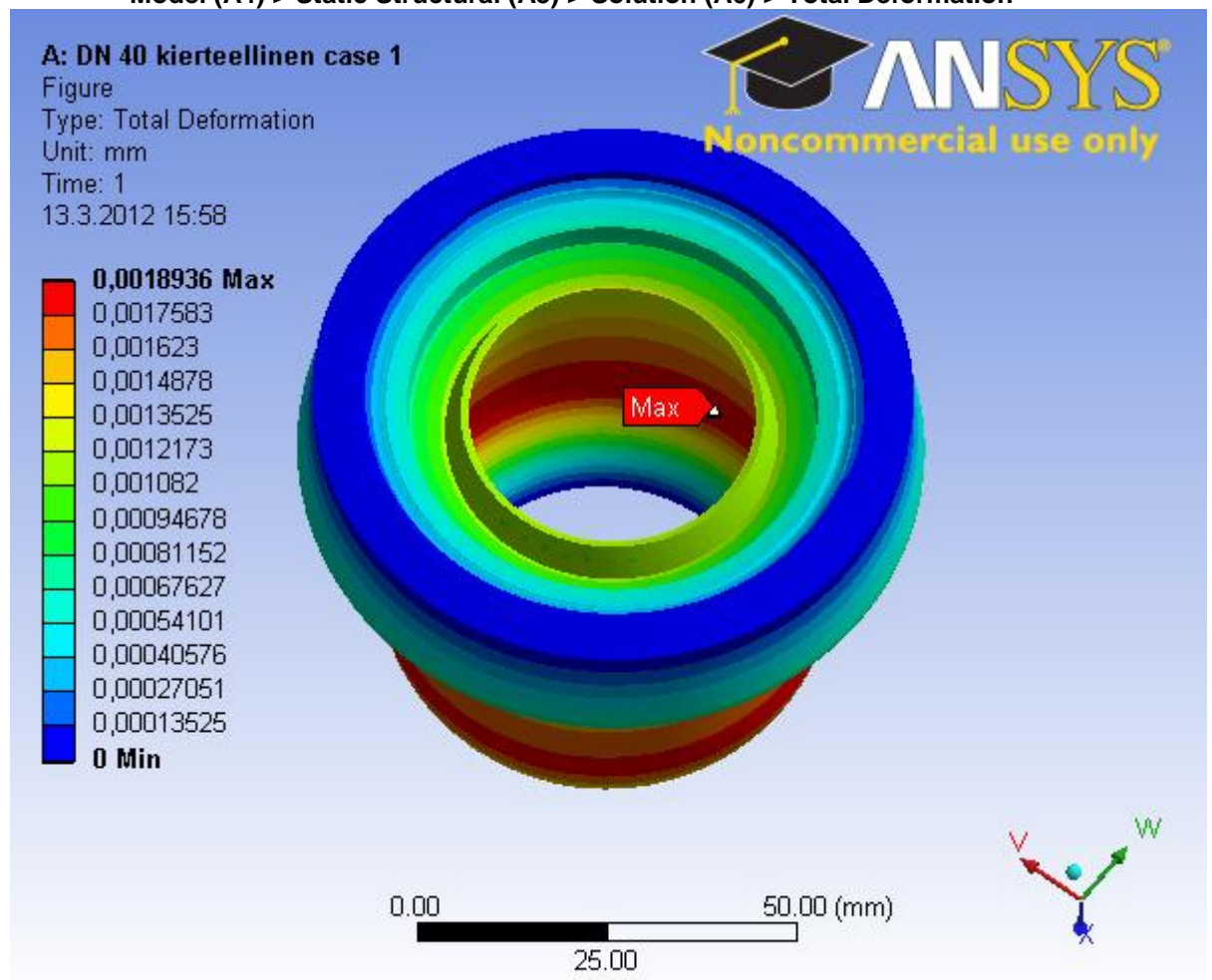
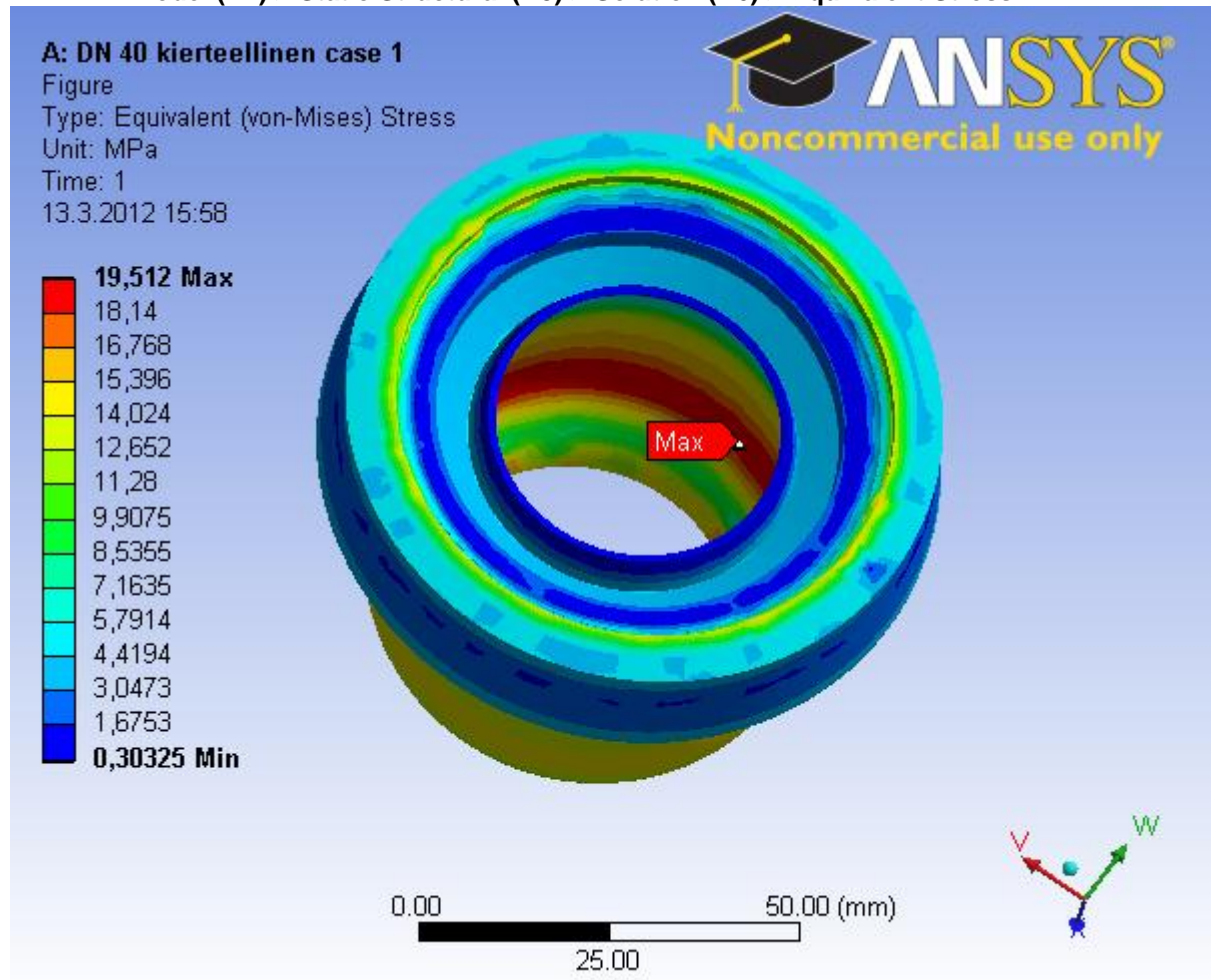


FIGURE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress



Material Data

Structural Steel

TABLE 12
Structural Steel > Constants

Density	7.85e-006 kg mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	4.34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	6.05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1.7e-004 ohm mm

TABLE 13
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
0

TABLE 14
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
355

TABLE 15
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
355

TABLE 16
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
510

TABLE 17
Structural Steel > Alternating Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999	10	0
2827	20	0
1896	50	0
1413	100	0
1069	200	0
441	2000	0
262	10000	0
214	20000	0
138	1.e+005	0
114	2.e+005	0
86.2	1.e+006	0

TABLE 18
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coef- ficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Har- dening Exponent
920	-0.106	0.213	-0.47	1000	0.2

TABLE 19
Structural Steel > Relative Permeability

Relative Permeability
10000

TABLE 20
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio
	2.e+005	0.3

Yhteenveto

19 (19)

Perusaine S355J2G3: myötölujuus R_{eH} 355 MPa

Sallittu maksimijännitys SFS-EN 10025 standardin mukaisesti 325 MPa

Sallittu maksimijännitys hitsausliitoksissa painedirektiivin mukaisesti $0,85 \times 325 \text{ MPa} = 276 \text{ MPa}$

Sulun maksimijännitys kohdistuu sulun runko-osaan, joka on 19,5 MPa (figure 10).

Varmuusluku on $325 \text{ MPa} / 19,5 \text{ MPa} = 16,7 \rightarrow$ Liitos kestää

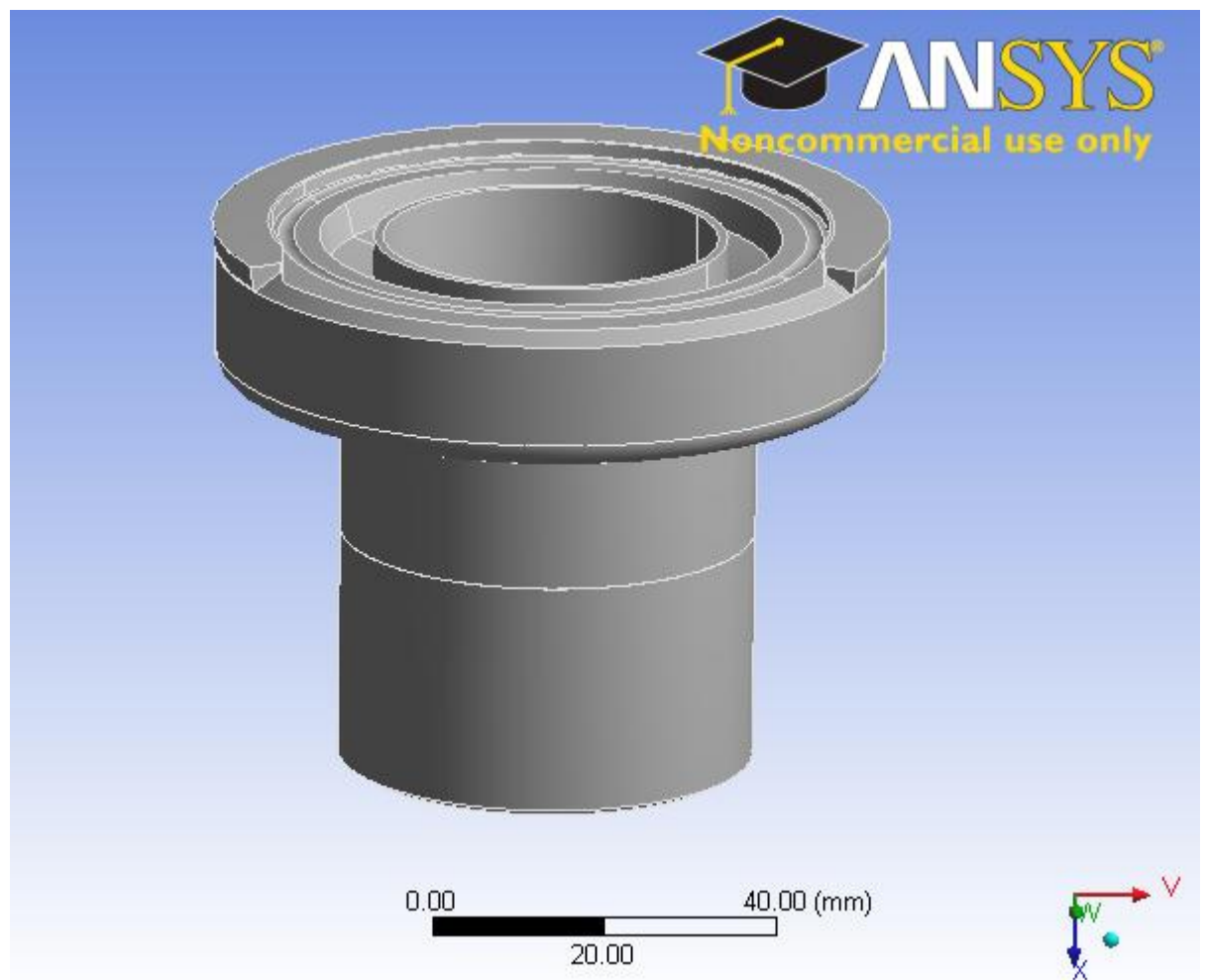
Lujuuslaskennan tuloksena kierrepuolen DN 40 sululle saadaan ympärihitsatussa tilanteessa 25 barin paineella varmuusluvuksi 16,7.

Lujuuslaskennan tuloksena kierrepuolen DN 40 sululle saadaan ympärihitsatussa tilanteessa 25 barin paineella tiiviste-kohdan maksimisiirtymäksi 0,001 mm (figure 9).



DN 40 kierrepuoli case 2

First Saved	Tuesday, February 14, 2012
Last Saved	Tuesday, March 13, 2012
Product Version	12.0.1 Release



(jatkuu)

Contents

2 (16)

- [Units](#)
- [Model \(A4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Part1](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Mesh](#)
 - [Static Structural \(A5\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Solution \(A6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Results](#)
- [Material Data](#)
 - [Structural Steel](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (A4)

Geometry

TABLE 2

Model (A4) > Geometry (taulukko jatkuu seuraavalla sivulla)

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
Definition	
Source	X:\projects\Porasulkujen_lujuuslaskenta_NF\Opinnäytetyö\Mallinnus\Sulku DN 40\DN 40 kierteellinen_hitsi_5mm_1.stp
Type	Step
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Part Color
Bounding Box	
Length X	79,009 mm
Length Y	78,504 mm
Length Z	65,01 mm
Properties	
Volume	80090 mm ³
Mass	0,6287 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1

Nodes	29204
Elements	16742
Mesh Metric	None
Preferences	
Import Solid Bodies	Yes
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	No
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\k7nfinisk.TAMK\AppData\Roaming\Ansys\v120
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (A4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Part1</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	79,009 mm
Length Y	78,504 mm
Length Z	65,01 mm
Properties	
Volume	80090 mm ³
Mass	0,6287 kg
Centroid X	-2,9824e-003 mm
Centroid Y	-0,39763 mm
Centroid Z	18,924 mm
Moment of Inertia Ip1	419,4 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	423,19 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	519,17 kg·mm ²
Statistics	
Nodes	29204
Elements	16742
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System

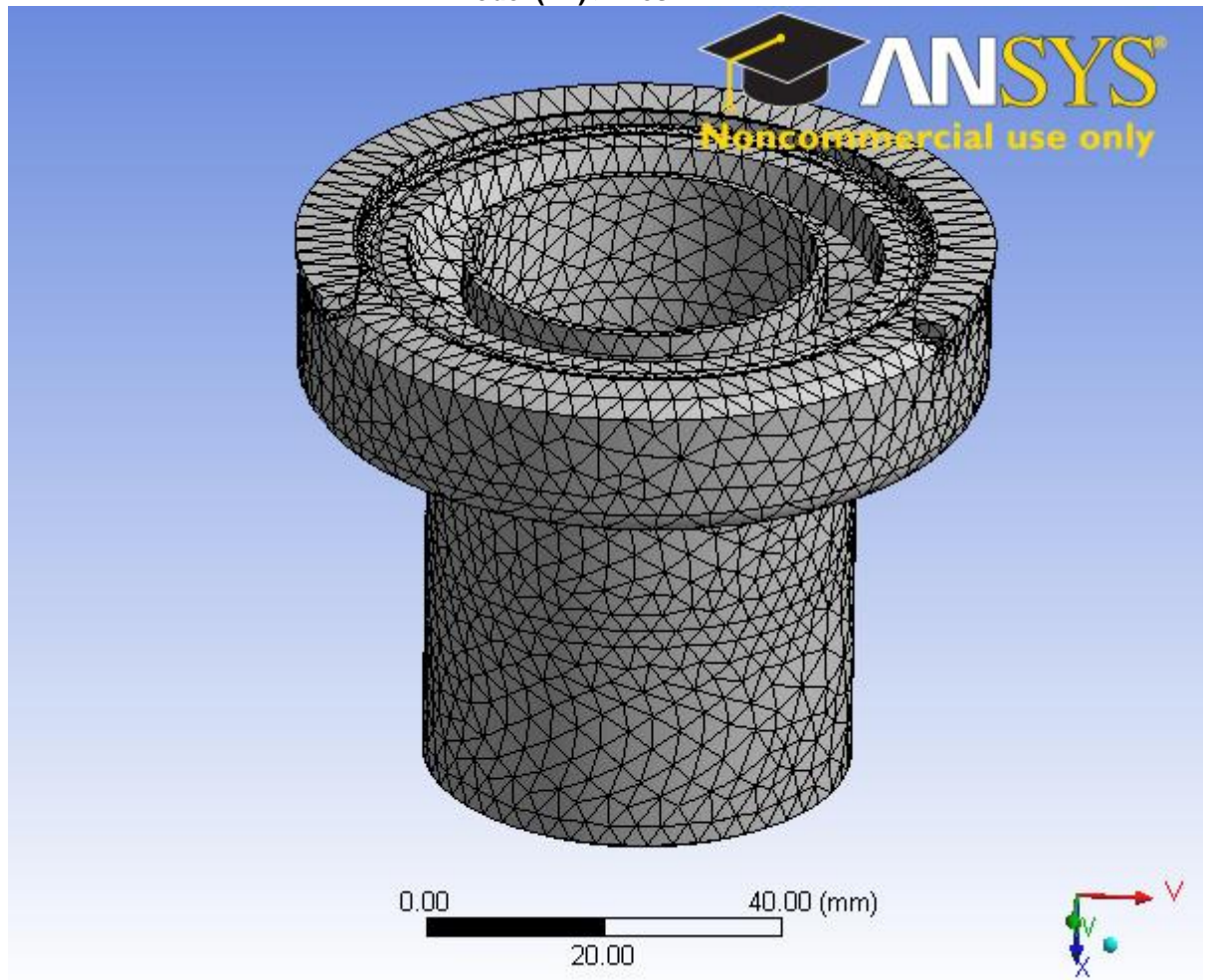
Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Ansys System Number	0,
Origin	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
Origin Z	0, mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

Mesh

TABLE 5
Model (A4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Medium
Element Size	3,0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1,e-002 mm
Inflation	
Use Automatic Tet Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Kept
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Pinch	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate on Refresh	No
Statistics	
Nodes	29204
Elements	16742
Mesh Metric	None

FIGURE 1
Model (A4) > Mesh



Static Structural (A5)

TABLE 6
Model (A4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (A5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	ANSYS Mechanical
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Nonlinear Controls	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Output Controls	
Calculate Stress	Yes
Calculate Strain	Yes
Calculate Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	X:\projects\Porasulkujen_lujuuslaskenta_NF\Opinnäytetyö\Lujuuslaskut\DN 40\DN 40 kierteellinen case 2_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save ANSYS db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mm

TABLE 8
Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads

Object Name	Hitsi väli	Voima sulkulevystä
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Face	
Definition		
Type	Displacement	Force
Define By	Components	Vector
Coordinate System	Global Coordinate System	
X Component	Free	
Y Component	Free	
Z Component	0, mm (ramped)	
Suppressed	No	
Magnitude		2986, N (ramped)
Direction		Defined

FIGURE 2
Model (A4) > Static Structural (A5) > Hitsi väli

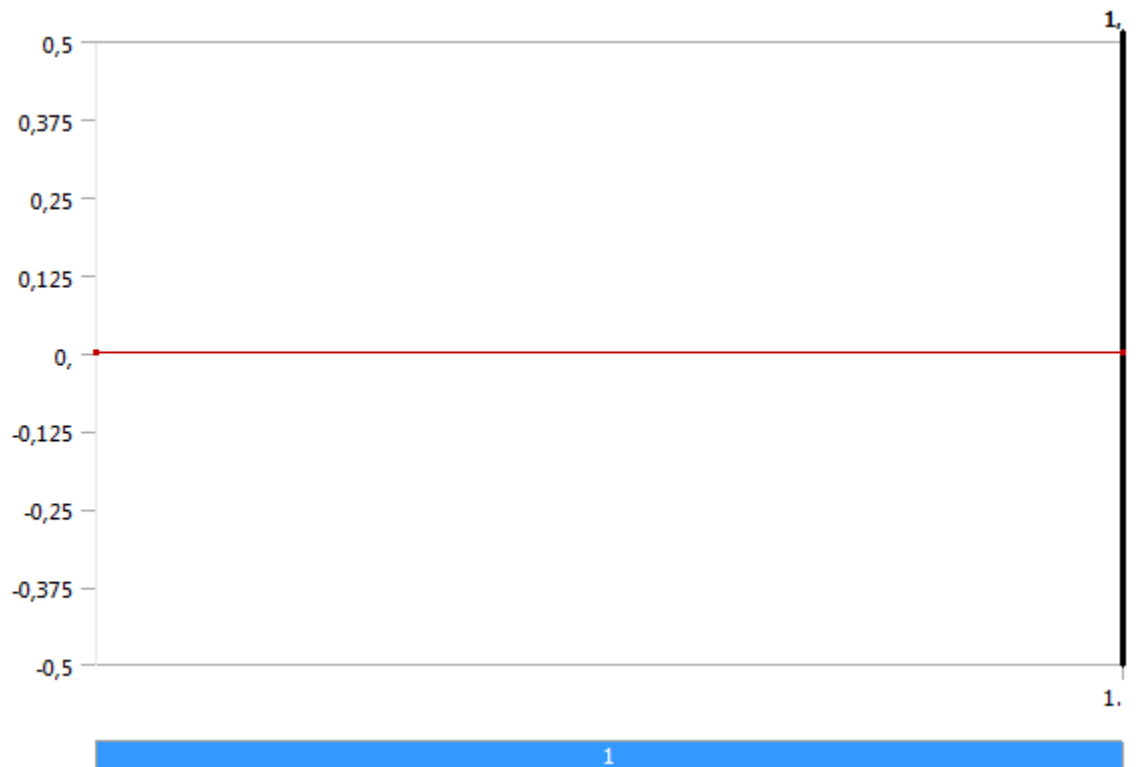


FIGURE 3
Model (A4) > Static Structural (A5) > Hitsi väli

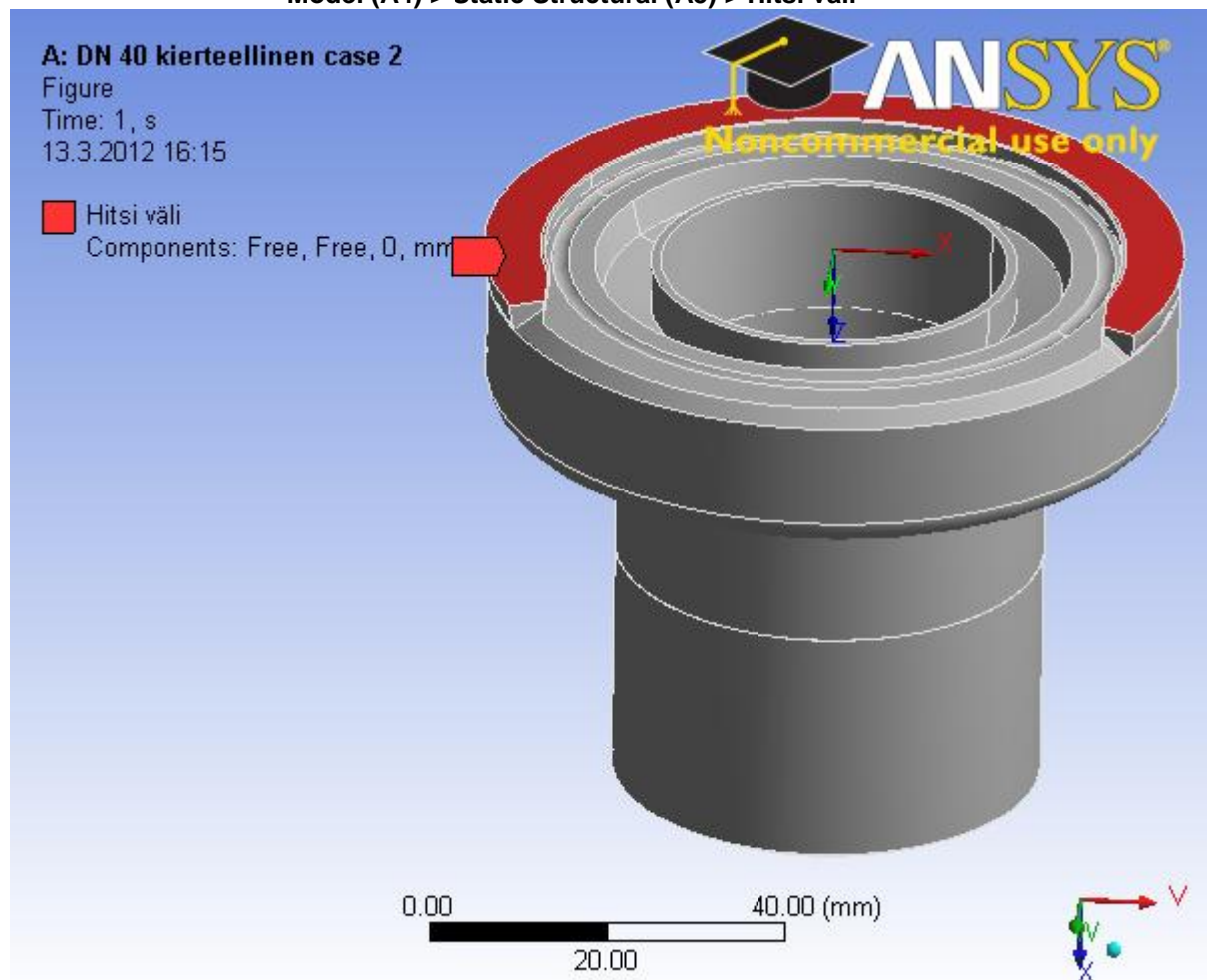


FIGURE 4
Model (A4) > Static Structural (A5) > Voima sulkevystä

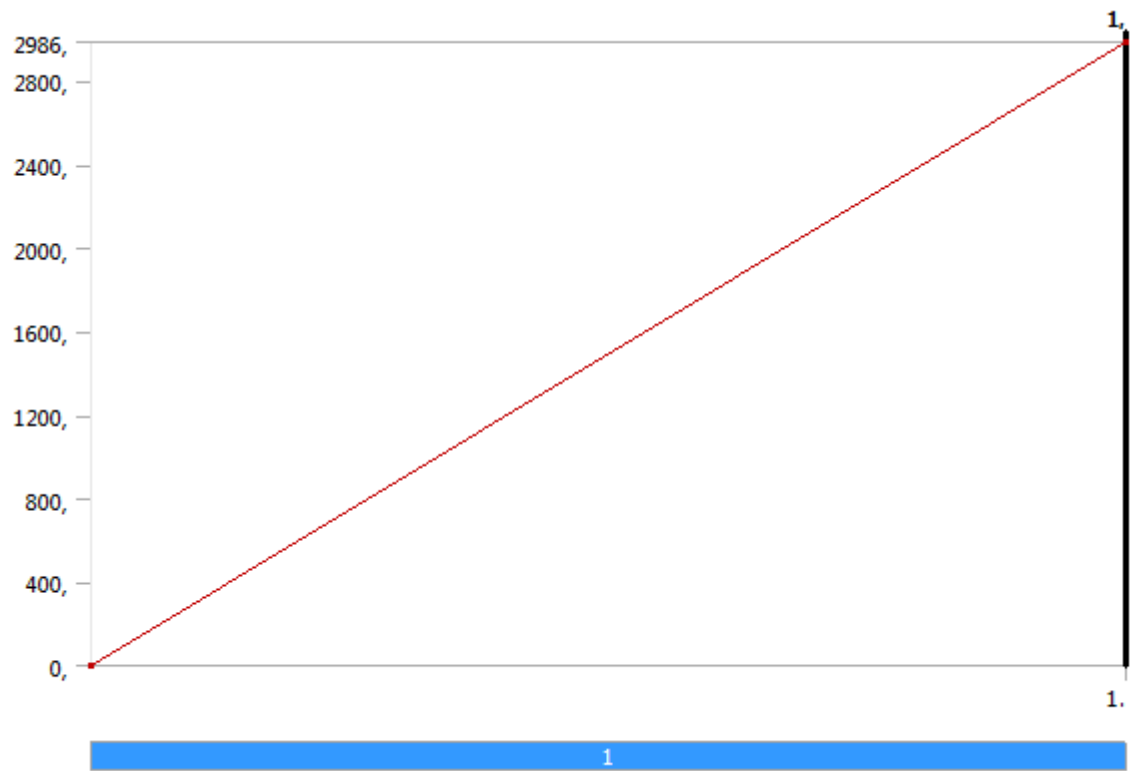
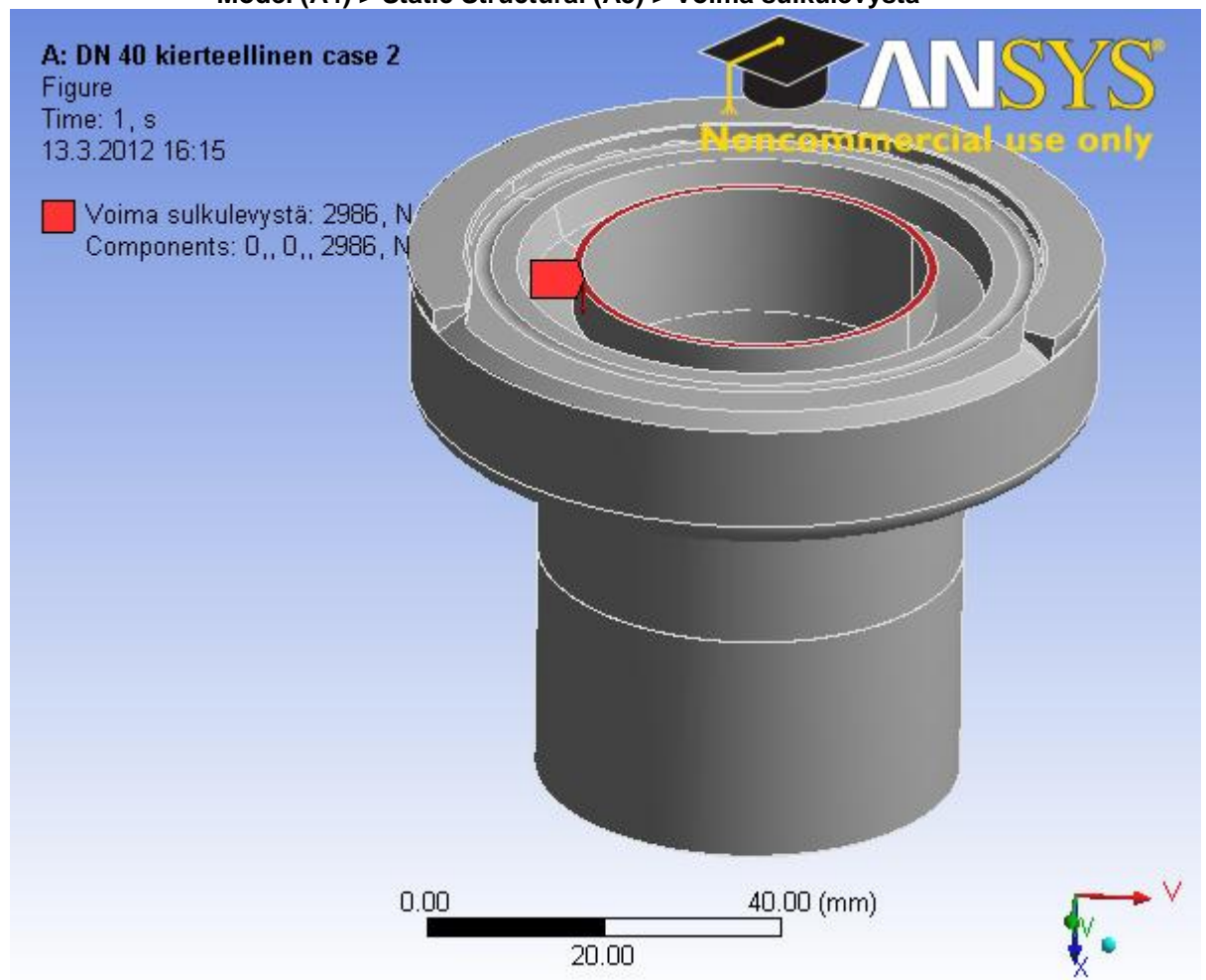


FIGURE 5
Model (A4) > Static Structural (A5) > Voima sulkulevystä



Solution (A6)

TABLE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,

TABLE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All

TABLE 11
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Use Average		Yes
Results		
Minimum	9,9993e-004 mm	9,5659e-002 MPa
Maximum	6,8155e-003 mm	123,25 MPa
Information		
Time	1, s	
Load Step	1	
Substep	1	
Iteration Number	1	

FIGURE 6
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

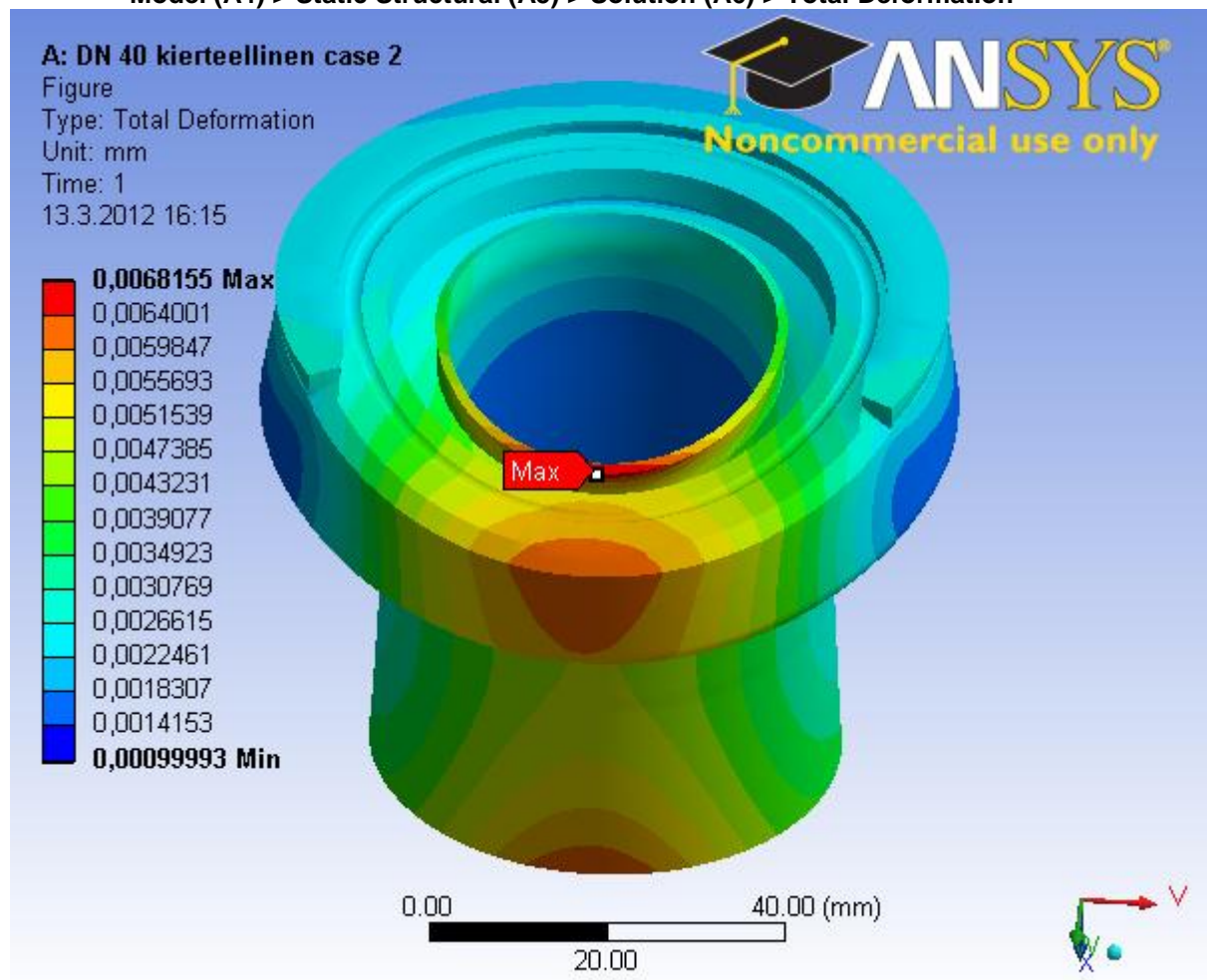
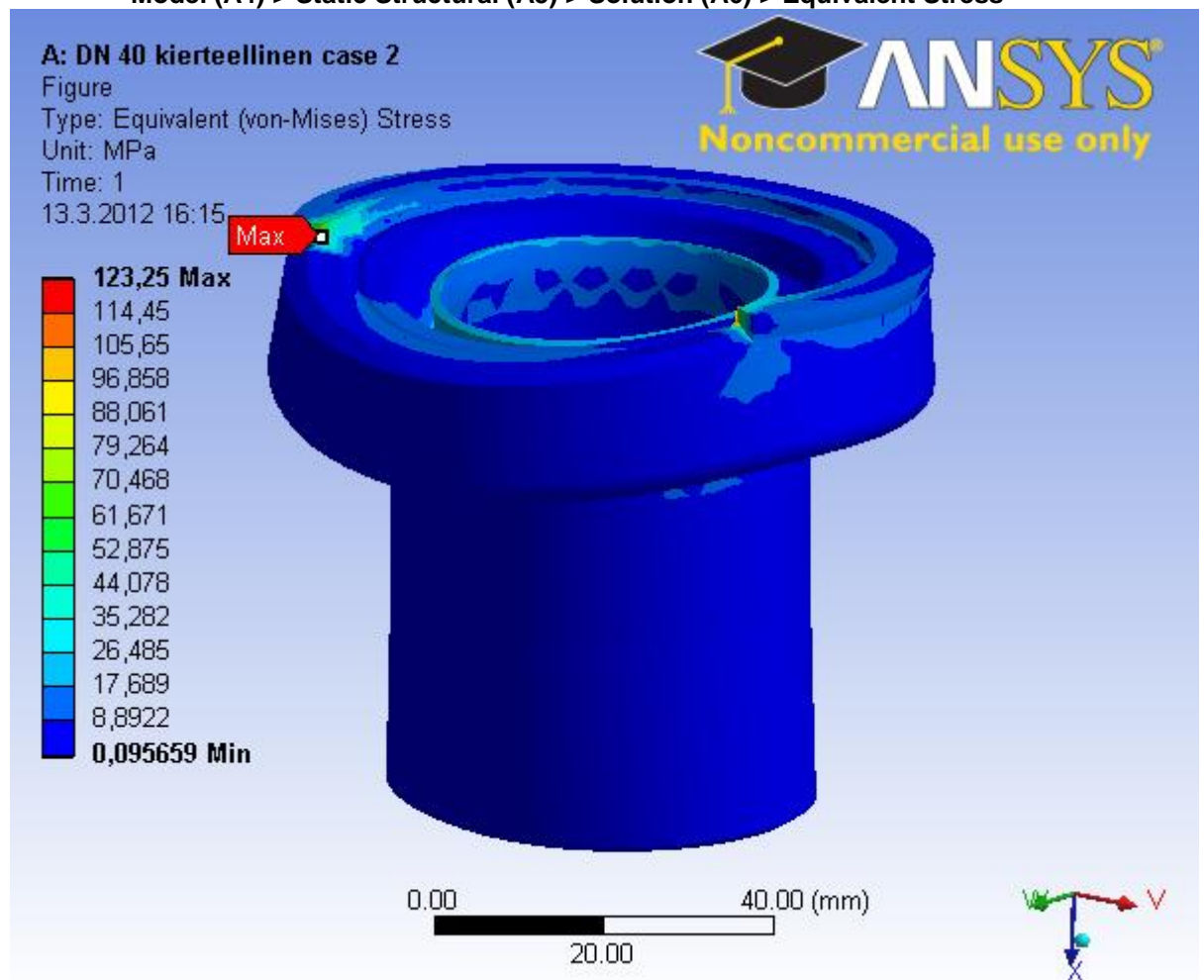


FIGURE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress



Material Data

Structural Steel

TABLE 12
Structural Steel > Constants

Density	7.85e-006 kg mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	4.34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	6.05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1.7e-004 ohm mm

TABLE 13
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
0

TABLE 14
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
355

TABLE 15
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
355

TABLE 16
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
510

TABLE 17
Structural Steel > Alternating Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999	10	0
2827	20	0
1896	50	0
1413	100	0
1069	200	0
441	2000	0
262	10000	0
214	20000	0
138	1.e+005	0
114	2.e+005	0
86.2	1.e+006	0

TABLE 18
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920	-0.106	0.213	-0.47	1000	0.2

TABLE 19
Structural Steel > Relative Permeability

Relative Permeability
10000

TABLE 20
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio
	2.e+005	0.3

Yhteenveto

16 (16)

Perusaine S355J2G3: myötölujuus R_{eH} 355 MPa

Sallittu maksimijännitys SFS-EN 10025 standardin mukaisesti 325 MPa

Sallittu maksimijännitys hitsausliitoksissa painedirektiivin mukaisesti $0,85 \times 325 \text{ MPa} = 276 \text{ MPa}$

Sulun maksimijännitys kohdistuu hitsausliitokseen, joka on 123,3 MPa (figure 7).

Varmuusluku on $276 \text{ MPa} / 123,3 \text{ MPa} = 2,2 \rightarrow$ Liitos kestää

Lujuuslaskennan tuloksena kierrepuolen DN 40 sululle saadaan sulkulevytilanteessa 25 barin paineella varmuusluvuksi 2,2.

Lujuuslaskennan tuloksena kierrepuolen DN 40 sululle saadaan sulkulevytilanteessa 25 barin paineella tiiviste-kohdan maksimisiirtymäksi 0,006 mm (figure 6).

Sulku DN 40

Paine	25 bar
Paineesta aiheutuva voima	2986 N
Elementti	Kvadraattinen
Elementin koko	3,0 mm
Sallittu max jännitys (Re)*	325 MPa
Sallittu max jännitys hitsisaumassa (Re hitsi)**	276 MPa

Kierrepuolen sulku on mallinnettu ilman kierteitä käyttäen halkaisijana kierteen sisähalkaisijaa

Suora case 1:

VVEH/Von Mises jännitys	20,3 MPa
Varmuusluku (Re)	16,0
Siirtymä tiivisteen kohdalla	0,001 mm

Kierteellinen case 1:

VVEH/Von Mises jännitys	19,7 MPa
Varmuusluku (Re)	16,7
Siirtymä tiivisteen kohdalla	0,001 mm

Kierteellinen case 2:

VVEH/Von Mises jännitys	123,3 MPa
Varmuusluku (Re hitsi)	2,2
Siirtymä tiivisteen kohdalla	0,006 mm

*** Standardi**

SFS-EN 10025-2

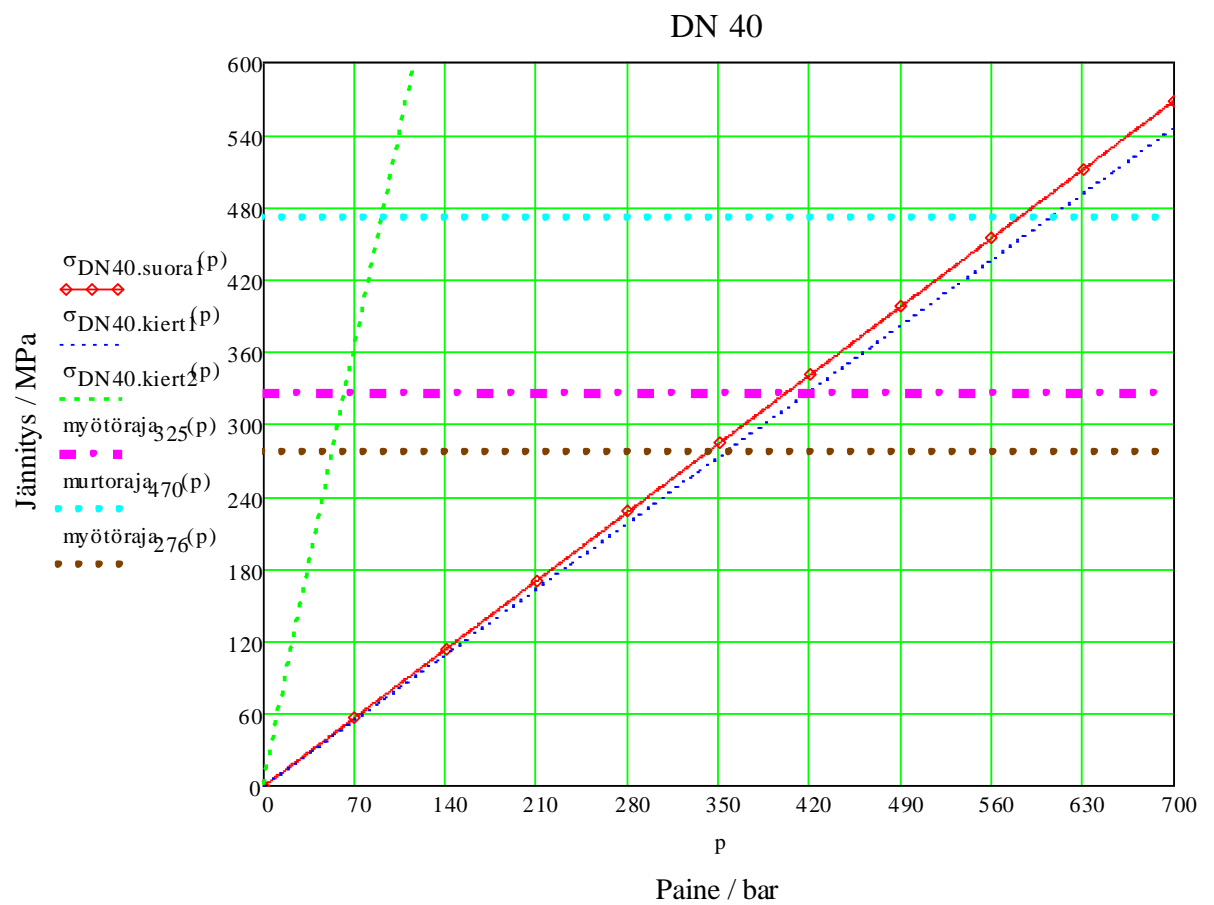
Taulukko 7: Aineen myötörajan ja murtolujuuden mekaaninen ominaisuus nimellispak-suudesta riippuen.

**** Painelaitedirektiivi**

97/23/EY

Hitsausliitoksen lujuuskerroin: ainetta rikkomattomat tarkastukset; 0,85.

(jatkuu)



KUVIO: DN 40 sulun jännitys - paine -käyrästä

DN40suora1: Sulun DN 40 suoran puolen case 1

DN40kiert1: Sulun DN 40 kierrepuolen case 1

DN40kiert2: Sulun DN 40 kierrepuolen case 2